IIT-UDEC
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECÁNICA

FUNDAMENTOS DE TRIBOLOGIA

RELATOR: GABRIEL BARRIENTOS

10-11-12 de Junio 2026

Índice general

1. Tribología **7**
1.1. Fricción 7
1.2. Tipos de lubricación 8
1.2.1. Lubricación Límite 8
1.2.2. Lubricación Mixta 9
1.2.3. Lubricación Hidrodinámica 9
1.2.4. Lubricación Elastohidrodinámica (EHL) 9
1.3. Tipos de lubricantes 10
1.4. Funciones de un Lubricante 13
1.4.1. Para Lubricación límite 13
1.4.2. Para lubricación fluida 14
1.4.3. Para lubricación Elastohidrodinámica (EHL) 15
1.4.4. Lubricantes EP de 1ra generación 16
1.4.5. Lubricantes EP de 2da. generación 16
1.4.6. Lubricantes EP de 3ra generación 18
1.5. Cálculo consumo energía 18
1.5.1. Rodamientos 20
1.5.2. Cojinetes lisos 20
1.5.3. Reductores de velocidad 20
1.5.4. Coeficiente de fricción 21
1.6. Desgaste 21
1.6.1. Tipos de desgaste 23
1.7. Cálculo desgaste 33

2. Propiedades de los lubricantes **35**
2.1. Viscosidad del aceite 35
2.1.1. Viscosidad dinámica 35
2.1.2. Viscosidad cinemática 36
2.1.3. Relación Viscosidad - Temperatura 37

2.1.4. Indice de viscosidad 37
2.1.5. Relación de corte - viscosidad 41
2.1.6. Mezcla de viscosidad 41
2.1.7. Viscosidad del aceite 48
2.1.8. Densidad y gravedad específica 52
2.2. Análisis de laboratorio 54

3. Aceites y grasas lubricantes 69
3.1. Aceites lubricantes 70
3.1.1. Aceites orgánicos 70
3.1.2. Aceites minerales 70
3.1.3. Fabricación de aceites lubricantes 71
3.1.4. Bases lubricantes 71
3.1.5. Base parafínica 71
3.1.6. Bases nafténicas 72
3.1.7. Bases aromáticas 73
3.2. Aditivos 74
3.2.1. Características de los aditivos 75
3.2.2. Propiedades de los aditivos 75
3.2.3. Clasificación de los aditivos 76
3.2.4. Modificadores de propiedades fisico químicas 80
3.2.5. Aspectos a considerar en aceites con aditivos 83
3.2.6. Lubricantes compuestos 83
3.3. Factores que acortan la vida de un aceite 84
3.4. Grasas lubricantes 86
3.4.1. Espesadores 89
3.4.2. Tipos de espesantes (jabones metálicos) 91
3.4.3. Aceite base 93
3.4.4. Consistencia de las grasas 94
3.4.5. Selección de la grasa 94
3.4.6. Miscibilidad de las grasas 96

4. Cables y cadenas 99
4.1. Lubricación de cables 99
4.1.1. Tipos de cables 99
4.1.2. Lubricación 99
4.1.3. Métodos de lubricación 101
4.2. Cadenas 105
4.2.1. Tipos de cadenas 105
4.2.2. Selección de cadenas 105

4.2.3. Lubricación 108

5. Rodamientos 119
5.1. Vida de un rodamiento 119
5.1.1. Fórmula de vida nominal ajustada 120
5.2. Lubricación 127
5.2.1. Velocidad de operación 129
5.2.2. Carga 131
5.2.3. Temperatura 133
5.3. Métodos de Lubricación 135
5.3.1. Lubricación por grasa 135
5.3.2. Frecuencia de lubricación 137
5.3.3. Tipos de grasa 140
5.3.4. Selección de la grasa 141
5.3.5. Lubricación por aceite 144
5.3.6. Características del aceite 144
5.3.7. Viscosidad del aceite requerido 149
5.4. Cálculo del tipo de lubricación 155

6. Engranajes 161

7. Análisis de aceite 171
7.1. Ferrografía directa (conteo de partículas) 173
7.2. Espectrofotometría de absorción atómica 173
7.3. Ferrografía analítica 173
7.4. Composición de partículas 174
7.5. Conteo de partículas 177
7.6. Filtros 178
7.7. Objetivos de limpieza 181
7.8. Material de discusión 192

Capítulo 1

Tribología

Por definición *Tribos* = *fricción* y *logos* = *tratado*. El estudio de la fricción conduce a optimizar el funcionamiento de máquinas ya que si la fricción disminuye, se pierde menor energía por ese concepto. Para muchos la palabra Tribología constituye el estudio de la *fricción*, del *degaste* y de la *lubricación* al mismo tiempo.

1.1. Fricción

Se entiende por fricción a la pérdida de energía mecánica durante el deslizamiento entre dos superficies. La lubricación de estas superficies en contacto es el arte de disminuir la pérdida por fricción. Las principales pérdidas de energía son las fricciones entre superficies con movimiento relativo, las que se pueden clasificar como:

- Fricción de deslizamiento. Presenta las siguieentess características:
  - La fuerza de fricción F es proporcional al peso W del elemento que desliza: $F = \mu W$. El factor de proporcionalidad se denomina μ y se le llama coeficiente de roce.
  - F es independiente del área de contacto
  - F es independiente de la velocidad de deslizamiento
  - F varía de acuerdo a la naturaleza de los materiales y del acabado superficial
- Fricción por rodadura:
  - Varía con la carga

- Es inversamente proporcional al diámetro del elemento rodante,
- Es menor para superficies pulidas que para superficies rugosas

Es un tipo de fricción que no siempre se debe evitar, ya que el roce permite que el giro de la rueda se produzca.

1.2. Tipos de lubricación

La figura 1.1 muestra la relación que se presenta entre los distintos tipos de lubricación presentes en zonas donde se trata de evitar el roce usando un lubricante. La gráfica representa estas zonas en función de los coeficientes de roce y entrega un valor relativo entre la separación mínima que se obtiene (huelgo) entre las superficies metálicas, asociadas al tipo de lubricación producida. El valor de este huelgo mínimo se denomina h_0.

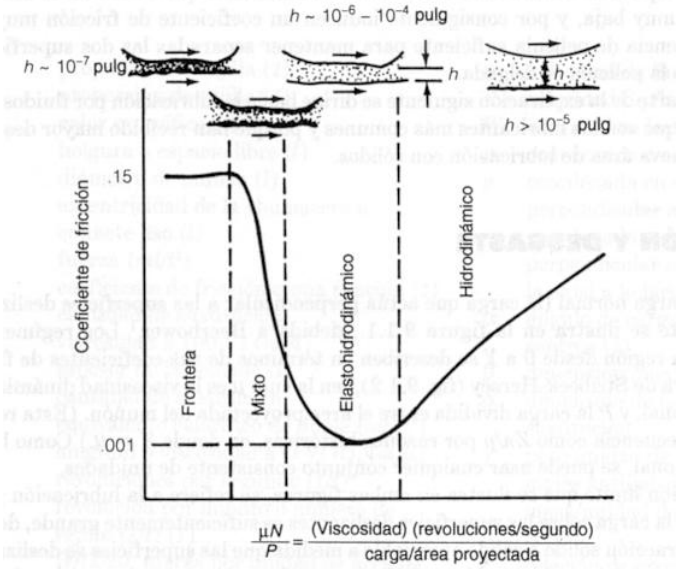


Figura 1.1: Distintos tipos de lubricación según espesor de película

1.2.1. Lubricación Límite

Es la formación de una capa que se adhiere a las superficies metálicas e impide que cuando estas deslicen la una sobre la otra, se presente el contacto

metal metal y por consiguiente el desgaste adhesivo. La lubricación por película límite se presenta siempre que un mecanismo arranque o se detenga.

1.2.2. Lubricación Mixta

Es una condición intermedia entre las películas límite o hidrodinámica, en la cual un buen porcentaje de las crestas de las dos superficies interactúan presentándose la película límite y otras ya están separadas en las cuales la película límite no desempeña ninguna labor.

En lubricación mixta el desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película límite, como de la resistencia a la cizalladura de la película fluida y de su estabilidad.

1.2.3. Lubricación Hidrodinámica

Se presenta cuando las dos superficies metálicas están completamente separadas y la película límite ya no desempeña ninguna labor. El consumo de energía depende de la resistencia a la cizalladura, de la película fluida y el desgaste de la estabilidad de ésta con los cambios de temperatura.

1.2.4. Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

Este es un tipo interesante de lubricación que desde su descubrimiento por los profesores británicos Duncan Dowsan y Gotion Higginson en la década de los años 60, marcaron el verdadero comienzo a la solución de los problemas de desgaste en mecanismos que funcionaban sometidos a condiciones de altas cargas y bajas velocidades y que hasta entonces se manejaban como mecanismos lubricados por película límite.

La lubricación EHL se presenta en mecanismos cuyas superficies de fricción trabajan siempre entrelazadas y nunca llegan a separarse. En este caso las crestas permanentemente se están deformando elásticamente y el control del desgaste y el consumo de energia depende de la pelicula adherida a las rugosidades.

Se podria denominar esta película como límite pero las características de soporte de carga y de resistencia al desgaste mucho más elevadas que las que forma la película límite hacen la diferencia. En la lubricacion EHL la lubricación límite es permanente, o sea que no hay mucha diferencia entre las condiciones de lubricación con el momento de la puesta en marcha

del mecanismo y una vez que éste alcanza la velocidad nominal de operación.

La definición de la lubricación elastohidrodinámica se puede explicar asi:

- Elasto: elasticidad, o sea que la cresta de la irregularidad en el momento de la interacción con la cresta de la otra superficie se deforma elásticamente sin llegar al punto de fluencia del material;
- Hidrodinámica: una vez que ocurre la deformación elástica la película de aceite que queda atrapada entre las rugosidades forma una película hidrodinámica del tamaño microscópico mucho menor que el que forma una película hidrodinámica propiamente tal.

En la lubricación hidrodinámica el espesor de la película lubricante puede ser del orden de 1 μm en adelante, mientras que en la EHL, de 0.5 μm o menos.

1.3. Tipos de lubricantes

Los lubricantes minerales provienen del Petróleo que está compuesto principalmente por Hidrógeno (11 al 15 %) y Carbono (83 al 87 %), de ahí su nombre de Hidrocarburo. En ínfima cantidad también se compone de Azufre (0.1 al 6 %) y Oxigeno, Nitrógeno y Metales con presencia menor al 1 %.

El petróleo crudo no se puede usar como lubricante por sus componentes demasiado pesados y volátiles, parafínas y otras sustancias no deseables. El comienzo del proceso de fabricación de los lubricantes minerales comienza en la refinería.

Existen varios tipos de hidrocarburos, entre los que destacan:

- Hidrocarburos parafínicos (C_nH_{2n+2}). La gasolina de él obtenido es de bajo octanaje, pero el kerosene, el combustible Diesel y los lubricantes son de excelente calidad. Sus características principales son:
    - baja densidad,
    - elevado indice de Viscosidad (80-90),
    - baja volatilidad (alto punto de inflamación),
    - Bajo poder disolvente (elevado punto de anilina, 90 - 100°C).

- Hidrocarburos Nafténicos (C_nH_{2n}). Sus productos se caracterizan por su bajo punto de fluidez. Gasolinas son normalmente buenas, los kerosenes y lubricantes son inferiores a los de base parafínica. Sus características principales son:

  - Densidad relativamente elevada,
  - Bajo índice de viscosidad, (sobre 40),
  - mayor volatilidad que los parafínicos (bajo punto de inflamación),
  - poder disolvente elevado (buena miscibilidad con crudos parafínicos),
  - bajo punto de congelación natural.

- Hidrocarburos olefínicos (C_nH_{2n}). Las oléfinas de bajo punto de ebullición no están presentes en el petróleo crudo, pero se forman durante su destilación como consecuencia del *cracking*. Son suficientemente estables para ser usadas en gasolinas de motor.

- Hidrocarburos aromáticos (C_nH_{2n+6}). Esta serie es químicamente activa y suele denominarse como la serie del Benceno. Sus gasolinas poseen buenas cualidades antidetonantes. No son deseables en los kerosenos, en los diesel ni en las bases para aceites lubricantes, ya que producen barro durante su proceso de oxidación. Sus características son:

  - Densidad muy elevada,
  - Indice de viscosidad muy bajo,
  - fácilmente oxidables,
  - provocan formación de productos resinosos,
  - se emulsionan fàcilmente con el agua,
  - tienen un punto de anilina bajo.

La refinación del petróleo se procesa en las refinerías en torres de destilación, lo que produce un fracccionamiento de sus productos a distintos niveles de temperatura. La figura 1.2muestra el esquema de proceso del petróleo donde están presente sus principales productos bases.

Todos los productos petrolíferos consisten en moléculas de hidrocarburos y en su paso de líquido a gaseoso (o viceversa) a temperaturas dadas, generan diversos productos.

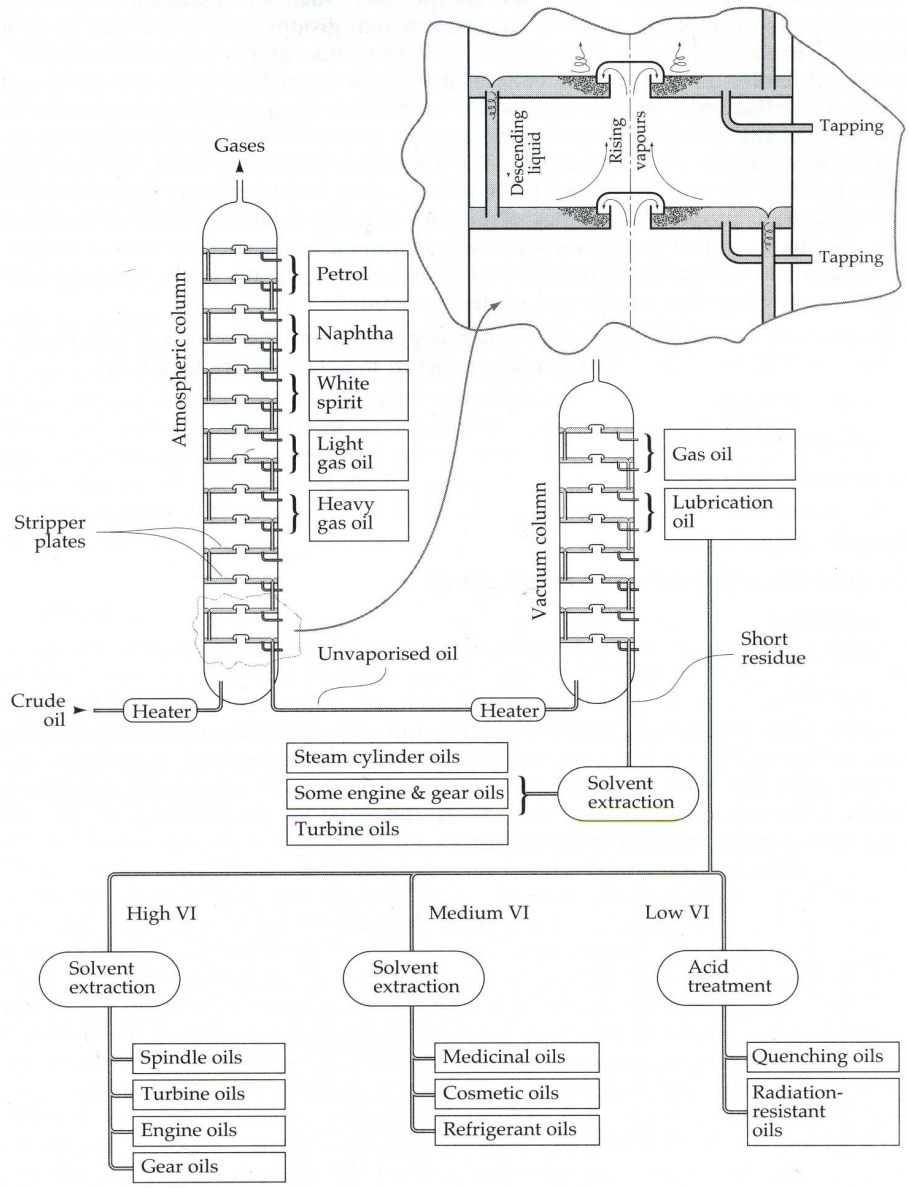


Figura 1.2: Esquema de refinación del Petróleo [2]

Se realiza en una torre de 20 a 30 niveles. Cada nivel se mantiene a una temperatura a la cual uno o más hidrocarburos se condensan. Los niveles de mayor temperatura están en la base. Cada nivel genera un producto derivado (destilado) diferente según lo mostrado en las figuras.

1.4. Funciones de un Lubricante

La Tabla 1.1 entrega un esquema básico del porqué se debe usar lubricantes en cualquier aplicación en que exista posibilidad de ahorro de energia

Cuadro 1.1: Funciones de un aceite Lubricante

Controlar la fricción	Separa las superficies en movimiento relativo
Controlar el desgaste	Reduce el desgaste abrasivo
Controlar la corrosión	Protege las superficies de las substancias corrosivas
Controlar la temperatura	Absorbe y transfiere el calor
Controlar la contaminación	Transporta partículas y otros contaminantes a los filtros y separadores
Transmitir potencia	En circuitos hidráulicos, transmite fuerza y movimiento

1.4.1. Para Lubricación límite

Las propiedades del lubricante para frotamiento límite son independientes de la viscosidad y se denominan *untuosidad*. Los compuestos de untuosidad son sustancias que tienen una gran afinidad por las superficies metálicas; sus moléculas adheridas a éstas mantienen su posición y se oponen a las fuerzas de desplazarniento.

Sus características más importantes son: estabilidad química a altas temperaturas, alta velocidad de reacción, baja toxicidad por efecto de los vapores o por la posibilidad de que se presenten infecciones en la piel y compatibilidad con los aceites a los cuales se les añaden estos compuestos.

Los productos más utilizados son los ácidos grasos por sus características de untuosidad y ciertos compuestos químicos como el *Tricresil-Fosfato*, el *Ditiosfosfato de Zinc*, los *Esteres Clorados*, el *Naftenato de Plomo* (hoy

en dia es poco utilizado por su agresividad al ambiente), el Tetracloruro de Carbono y las parafinas cloradas por su afinidad química con las superficies metálicas.

El agua aunque tiene una buena viscosidad, es un pésimo lubricante para condiciones de régimen límite porque carece de propiedades de untuosidad y de afinidad quimica.

El ácido graso es un ingrediente común en todos los aceites y grasas de origen animal, vegetal y de pescado. Los ácidos grasos más importantes son el aceite Esteárico (manteca de cerdo y sebo de carnero y de vaca); el ácido Palmítico (aceite de semilla de algodón y de palma) y el aceite oleico (de origen vegetal y animal).

Las características de untuosidad de los ácidos grasos es de tipo molecular y se debe a la cadena hidrocarbonada (OH y O) de los grupos carboxílicos en los cuales el extremo activo de la molécula se fija químicamente a la superficie metálica.

La velocidad de reacción depende de la naturaleza del metal, de la carga y de la velocidad de deslizamiento. Cuanto más larga sea la cadena hidrocarbonada y mayor el número de átomos de carbono, más eficiente será la separación de las superficies metálicas y menor el coeficiente de fricción.

Los aceites minerales de bases parafínicas puras carecen de grupos carboxílicos OH y O (son de carácter no polar y químicamente inactivos) por lo que son malos para condiciones de película límite, mientras que los asfálticos si los tienen lo cual los hace aptos para este tipo de lubricación.

La utilización en la formulación de un aceite de los compuestos de untuosidad o de los que son químicamente activos con las superficies metálicas depende de la compatibilidad de éstos con los demás aditivos del aceite, de los contaminantes a los cuales va a estar expuesto el aceite durante su funcionamiento y de las condiciones de operación del equipo.

1.4.2. Para lubricación fluida

Para este tipo de lubricación se debe seleccionar un lubricante que tenga una baja resistencia a la cizalladura de tal forma que permita reducir el consumo de energía necesaria pare hacer que la superficie móvil se desplace

fácilmente sobre la superficie estacionaria.

Para este tipo de lubricación, los lubricantes que presentan un mejor desempeño son los sintéticos que se caracterizan por tener coeficientes de friccion fluida en promedio entre un 5 y un 20 % por debajo de los aceites minerales.

1.4.3. Para lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

La figura 1.3 muestra la forma en que se distribuyen las presiones cuando se forma una película lubricante basada en la teoría elasto hidro dinámica.

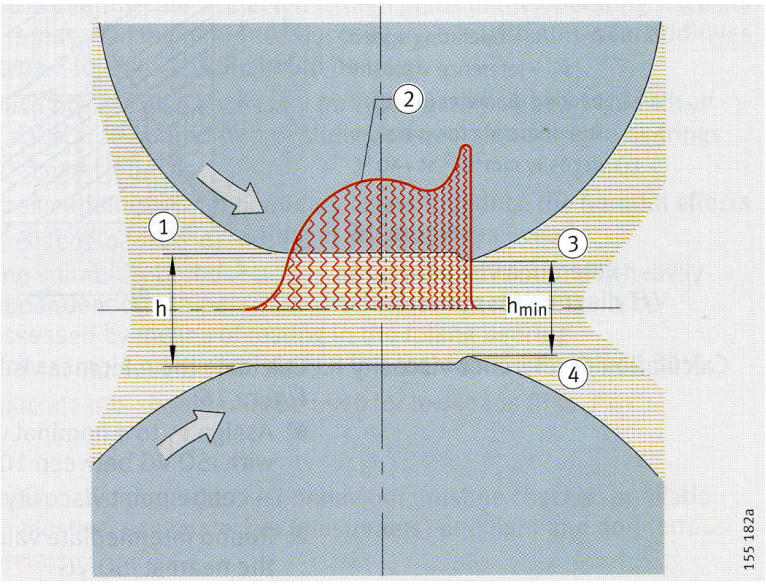


Figura 1.3: Distribución de presiones en un sistema de Lubricación Elasto Hidro Dinámica

En lubricación EHL los aditivos de Extrema Presión (EP) utilizados deben tener una baja resistencia a la cizalladura tanto para condiciones de película límite (condición más crítica) como fluida (cuando se deforman elasticamente las crestas de las dos superficies). La eficiencia de estos aditivos depende de la velocidad con que reaccionen (reactividad) con las superficies metálicas, sin embargo si es muy reactivo en una aplicación donde no se necesita, es perjudicial, ya que se presentaría una excesiva corrosión química.

Los aditivos EP pueden ser de 1ra, 2da y 3ra generación, la utilización de uno u otro tipo dependerá del grado de desarrollo que tenga la Tribología y la Lubricación (liderazgo, programas, conocimientos, etc) dentro de la empresa en la cual se quiere implementar un programa de ahorro de energía y de disminución del desgaste basados en el control de la fricción.

1.4.4. Lubricantes EP de 1ra generación

El desempeño de estos lubricantes es bueno, pero su coeficiente de fricción combinado f_c (fricción sólida y fluida) es alto y dan lugar a un área de soporte de carga equivalente a un 25 % del área aparente del mecanismo. De este tipo de lubricantes se tienen dos grupos generales:

a) Compuestos o *Compound* que son una mezcla de un 95 al 97 % de aceite mineral o sintético y un 3 al 5 % de ácidos grasos (por lo regular manteca de cerdo); reaccionan con las superficies metálicas a temperaturas menores o iguales a los 80°C y por encima de este valor se desprenden dando lugar al contacto metal metal y por lo tanto al desgaste del mecanismo.

b) Compuestos de tipo químico como los Esteres Clorados, la manteca de cerdo sulfurada y el Tricresilfosfato. Estos aditivos reaccionan químicamente con las superficies metálicas por encima de los 80°C; por debajo de esta temperatura su velocidad de reacción es muy baja o no reaccionan.

Cuando la temperatura de las rugosidades de un mecanismo que funciona bajo condiciones de lubricación EHL es fluctuante y puede variar entre menos y mas 80°C se deben utilizar lubricantes que tengan aditivos a base de ácidos grasos y de tipo químico. Como en la práctica es difícil cuanltificar en forma precisa esta temperatura, se toma como referencia para utilizar uno u otro tipo de aditivos una temperatura de 50°C en la superficie de la carcaza en la cual se encuentra alojado el mecanismo.

1.4.5. Lubricantes EP de 2da. generación

Estos lubricantes se caracterizan porque son una mezcla de un 95 a un 97 % de aceite mineral o sintético y un 3 a un 5 % de un lubricante de película sólida como el Bisulfuro de Molibdeno, el grafito, el Tungsteno o el Teflón. El más utilizado en la actualidad es el Bisulfuro de Molibdeno.

Este lubricante se caracteriza porque además de recubrir totalmente el perfil de las rugosidades de las dos superficies, rellena parte de los valles de

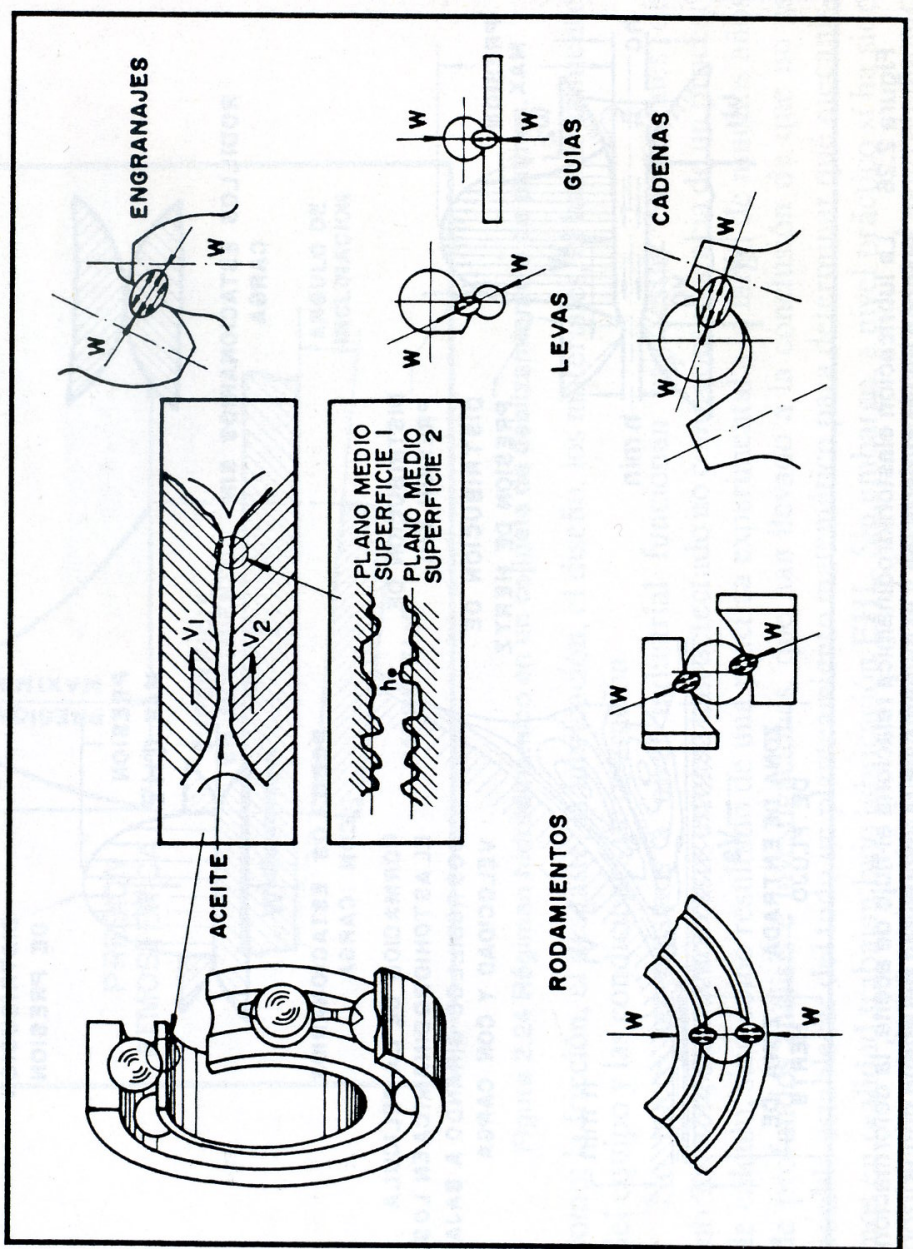


Figura 1.4: Casos donde se presenta la Lubricación Elasto Hidro Dinámica [7]

las mismas, incrementando el área de soporte de carga a un 40 % del área total del mecanismo. El coeficiente de fricción combinado de estos lubricantes es mayor que el de los de primera generación.

1.4.6. Lubricantes EP de 3ra generación

Estos lubricantes tienen aditivos de base organometálicas, los cuales cuando las superficies de friccion están sometidas a elevadas presiones liberan átomos metálicos que eutécticamente bajan el punto de fusión de las crestas más sobresalientes, haciendo que se deformen plásticamente llenando los valles de las irregularidades de las superficies.

El área de soporte de carga llega a ser hasta un 75 % del área total del mecanismo. Estos lubricantes presentan los coeficientes de fricción combinados más bajos dentro del grupo de lubricantes EP.

Las ventajas más importantes de estos lubricantes son:

- menor consumo de energía,
- menor fatiga de las piezas lubricadas al aumentar el área de soporte de carga,
- corrección de fallas como *pitting* incipiente o *descostrado* en dientes de engranajes,
- reducción de la temperatura de operacion, del nivel del ruido y las vibraciones.

Siempre que se vaya a llevar a cabo un programa de ahorro de energía es necesario conocer bajo que condiciones de lubricación (fluida o EHL) trabajan los elementos del equipo al cual se le va a hacer el estudio. A nivel práctico, se considera que un mecanismo trabaja bajo condiciones de película fluida, si el fabricante del equipo no recomienda para su lubricación, lubricantes con aditivos EP.

1.5. Cálculo consumo energía

Las siguientes ecuaciones se pueden utilizar para calcular el consumo de energía en diferentes tipos de mecanismos:

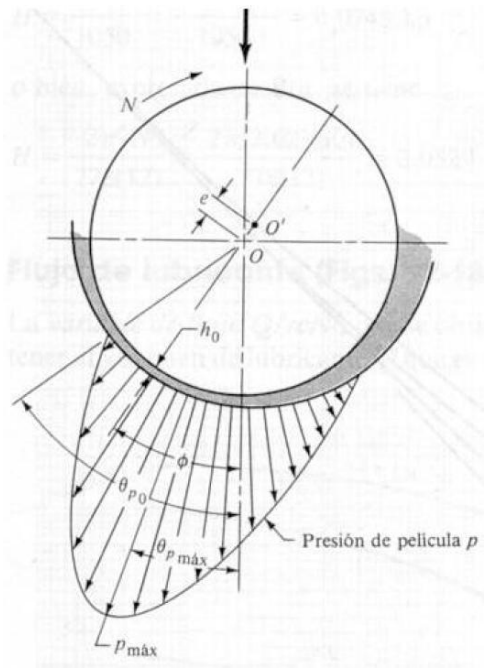


Figura 1.5: Lubricación hidrodinámica en un descanso deslizante, por ejemplo en el muñón de un motor de combustión interna

1.5.1. Rodamientos

$$CE = 5,14x10^{-6} fWdn \quad , \quad kW$$

Donde:
CE: Consumo de energía, kW.
f : Coeficiente de fricción del lubricante, adimensional.
W: Carga que actúa sobre el rodamiento, kgf.
d : Diámetro interior del rodamiento, cm.
n : Velocidad del rodamiento, rpm.

1.5.2. Cojinetes lisos

$$CE = 0,03077 fWdn \quad , \quad kW$$

Donde
CE: Consumo de energia, kW.
f : Coeficiente de friccion del lubricante, adimensional.
W : Carga que actúa sobre el cojinete, kgf
d : Diámetro del eje, m.
n : Velocidad del eje, rps

1.5.3. Reductores de velocidad

$$CE = 0{,}7357P(1 - e_t) \quad , \quad CV$$

Donde
P: Potencia transmitida por el reductor de velocidad, CV.
e_t: Eficiencia total de la transmisión, adimensional.
Se calcula según la expresión:

$$e_t = e_{1-2}e_{3-4}.....e_{e1}e_{e2}e_{e3}.....e_{a1}e_{a2}.....e_n$$

Donde:
$e_{1-2}, e_{3-4}, ...etc.$ representan la eficiencia del par de engranajes $1-2$, $3-4$, ..., etc.

$e_{e1}, e_{e2}, e_{e3}, ..., etc.$ representan la eficiencia promedio de los rodamientos (o de los cojinetes lisos) 1 y 2 , 3 y 4, 5 y 6, etc., montados en los ejes

$1, 2, 3$, ... etc., y se calcula en cada eje de la suma promedio de las eficiencias de cada rodamiento (o cojinete liso).

e_{a1}, e_{a2} , ... , etc. es la eficiencia equivalente del aceite salpicado (o que circula) por los engranajes $1, 2, 3$, ... , etc., que se sumergen parcialmente dentro del aceite.

e_n : eficiencia de otros elementos montados en el reductor de velocidad.

La eficiencia e_t es igual a $e = 1 - f$; donde f es el coeficiente de fricción que depende del tipo de película lubricante y se obtiene de la tabla que aparece en la figura 1.6

1.5.4. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción del lubricante (sólido, fluido o combinado) es uno de los parámetros más importantes que se deben tener en cuenta cuando se seleccione el lubricante para una aplicación específica y depende del tipo de mecanismo que se vaya a lubricar.

En el caso de rodamientos es mucho menor que cuando se trata de cojinetes lisos, ya que en los rodamientos, sea la lubricación limite o EHL, las rugosidades *engranan* por la curvatura de los elementos radantes, mientra que en los cojinetes lisos, interactuan entre sí y están sometidas a deformación elástica. El valor del coeficiente de fricción se encuentra en el catálogo del fabricante del lubricante, en caso contrario es necesario consultarlo con él.

En la tabla de la figura 1.6 se especifican valores típicos de coeficientes de fricción para lubricación límite, fluida y EHL en diferentes tipos de mecanismos. En caso de que no se conozca el coeficiente de fricción del lubricante que se va a utilizar se pueden usar los valores de esta tabla.

1.6. Desgaste

Es consecuencia directa del rozamiento metal metal entre dos superficies y se define como el deterioro sufrido por ellas a causa de la intensidad de la interacción de sus rugosidades superficiales.

El desgaste puede llegar a ser crítico, haciendo que las piezas de una máquina pierdan sus tolerancias y queden inservibles, causando costosos daños y elevadas pérdidas de producción. Una de las funciones básicas que

Mecanismo	Coeficiente de fricción									
	Sólida f_s		Fluida f_f		EHL f_e					
					Generación					
	Mineral	Sintético	Mineral	Sintético	1ra.		2da.		3ra.	
					Min.	Sint.	Min.	Sint.	Min.	Sint.
Rodamientos:										
- Rígido de bolas.	0.015	0.013	0.0085	0.00765	0.011	0.010	0.009	0.008	0.008	0.007
- De bolas de contacto angular.	0.020	0.018	0.0090	0.00800	0.014	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010
- De bolas a rótula.	0.010	0.009	0.0080	0.00720	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006
- Axial de bolas.	0.013	0.011	0.0083	0.00740	0.010	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007
- De rodillos cilíndricos.	0.011	0.009	0.0081	0.00720	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006
- De rodillos cónicos, esféricos y a rótula.	0.018	0.016	0.0088	0.00790	0.013	0.012	0.011	0.010	0.010	0.009
- De agujas.	0.022	0.019	0.0095	0.00850	0.015	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011
Engranajes cilíndricos de dientes rectos y helicoidales.	0.045	0.040	0.0100	0.00900	0.027	0.024	0.024	0.022	0.022	0.020
Engranajes Sinfin - Corona.	0.065	0.058	0.0200	0.01800	0.042	0.038	0.038	0.034	0.036	0.032
Cojinetes lisos.	0.060	0.054	0.008 (2)	0.00720	0.034	0.030	0.030	0.027	0.028	0.025

Notas:
(1) Por lo regular los engranajes sinfin-corona no trabajan bajo condiciones de lubricación Hidrodinámica.
(2) Este coeficiente de fricción fluida se calcula más exactamente a partir del Número de Sommerfeld.
(3) El coeficiente de fricción equivalente fe para aceite salpicado por engranajes es de 0,010 y para aceite a presión es de 0,005.

Figura 1.6: Valores típicos de coeficientes de fricción para diferentes tipos de lubricantes

debe tener toda sustancia que se emplee como lubricante es la de reducir la fricción sólida y por tanto, el desgaste a los valores más bajos posibles.

1.6.1. Tipos de desgaste

Una superficie lubricada se puede gastar por factores que pueden ser intrínsecos al tipo de lubricante utilizado, a su tiempo de servicio o debido a contaminantes externos. En algunos pocos casos se presenta como resultado de la selección incorrecta del equipo, de un mal diseño, o del empleo de materiales inadecuados para las condiciones de operación de los mecanismos. En las superficies lubricadas el proceso de desgaste es leve y genera partículas (del orden de 1 a 2 μm). Los tipos de desgaste más importantes son:

Adhesivo

O por contacto metal metal. Se presenta en todos los mecanismos lubricados o no, cuando las superficies no están separadas completamente por una película de aceite (lubricación límite). Este tipo de desgaste se presenta cuando un mecanismo para o arranca y hay escasez de la película límite como resultado del agotamiento de los aditivos antidesgaste del aceite, ya sea porque se está utilizando un aceite inadecuado o porque el tiempo de servicio del aceite ha sobrepasado el máximo permisible.

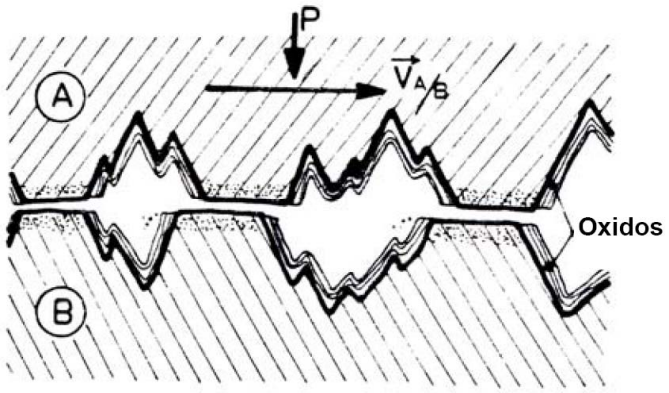


Figura 1.7: Ejemplo de desgaste adhesivo por cizallamiento

En este momento las irregularidades de ambas superficies están practicamente en contacto mutuo, hay transferencia metálica y formación de partículas o fragmentos metálicos de desgaste. Es un tipo de desgaste que

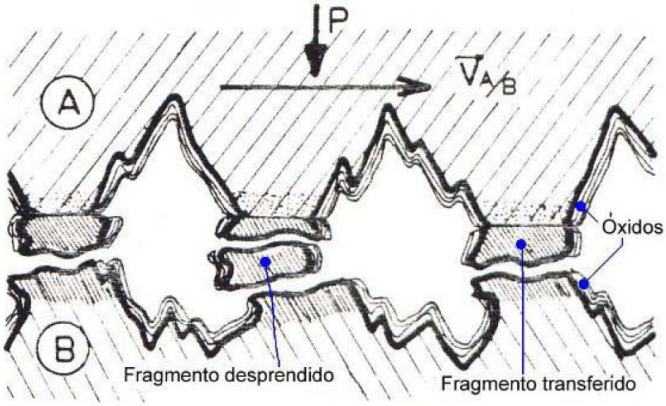


Figura 1.8: Ejemplo de desgaste adhesivo por soldadura

no se puede eliminar, pero si se puede reducir considerablemente mediante la utilización de lubricantes con óptimas propiedades de película límite, como los que contienen aditivos antidesgaste, ácidos grasos, aditivos EP, bisulfuro de molibdeno o grafito.

En algunos equipos el desgaste adhesivo prácticamente se puede eliminar cuando se utiliza la lubricación hidrostática. Si se eliminara este tipo de desgaste, la vida útil de los mecanismos dependería de otros factores diferentes a la lubricación y se podría decir que el desgaste sería controlable casi en un 100 %.

En la práctica, el desgaste adhesivo se puede presentar como consecuencia de un alto o bajo nivel de aceite, alta o baja viscosidad, y alta o baja presión. En el caso de un alto nivel de aceite, alta viscosidad y alta presión, el exceso de fricción fluida en el aceite incrementa la temperatura de operación, haciendo que las superficies metálicas se dilaten y rocen, rompiendo en un momento dado la película límite y dando lugar finalmente al desgaste adhesivo.

Abrasivo

Ocasiona el desgaste del mecanismo como resultado de la presencia entre las superficies en movimiento relativo de partículas extrañas de igual o mayor dureza a la de los materiales que los conforman. Las partículas abrasivas se incrustan ellas mismas en una de las superficies y actúan como

una herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie. Estas partículas pueden proceder del medio ambiente donde funciona la máquina, o del medio ambiente al interior de la misma, como consecuencia del desgaste adhesivo y/o corrosivo. El desgaste es mayor en la superficie más blanda.

Se ha demostrado que la abrasión es más pronunciada cuando el tamaño de la partícula es igual o ligeramente mayor que el juego dinámico (equivalente al espesor mínimo de la película lubricante) del mecanismo lubricado. La forma de la partícula también incide en la gravedad del desgaste.

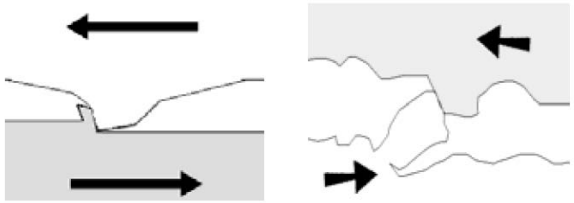


Figura 1.9: Ejemplo de desgaste abrasivo entre dos cuerpos

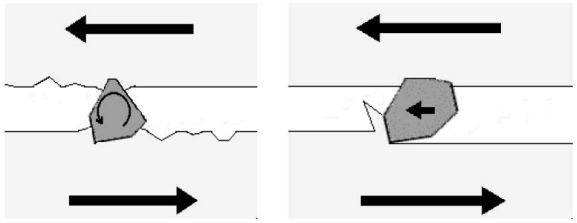


Figura 1.10: Ejemplo de desgaste abrasivo entre tres cuerpos

La abrasión es posible controlarla si se remueven del aceite las partículas abrasivas, cuyo tamaño se encuentra dentro del rango del juego dinámico; esto se puede lograr cambiando el aceite con más frecuencia si el sistema de lubricación es por salpique o implementando sistemas de filtración eficientes (micronaje adecuado y altas relaciones de filtración) cuando la lubricación es por circulación.

El desgaste abrasivo también se puede presentar aun cuando el tamaño de la partícula sea menor que el juego dinámico, como resultado de incrementos en la carga que actúa sobre el mecanismo o por disminución en la viscosidad del aceite, que hacen que el juego dinámico disminuya, quedando

su valor igual o ligeramente menor que el tamaño de la particula.

Corrosivo (por corrosión o herrumbre)

Es consecuencia de un aceite oxidado o de la contaminación de éste con agua o con ácidos del proceso o del medio ambiente. La herrumbre (en materiales ferrosos) y la corrosión ácida (en materiales blandos, como el Babbitt) pueden constituir un problema serio en una turbina de vapor, un motor de combustión interna o en cualquier máquina expuesta a la humedad.

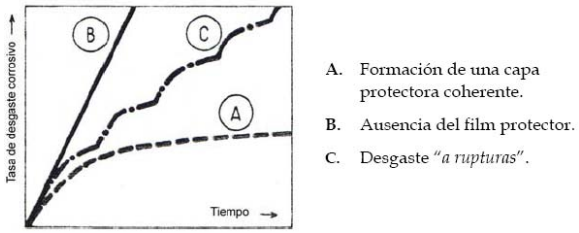


Figura 1.11: Tendencias comparativas del desgaste corrosivo en el tiempo

En los equipos industriales se puede presentar por dejar el aceite más del tiempo previsto. Esto permite que el TAN (Número Acido Total) o NN (Número de Neutralización) supere el valor máximo permisible para una aplicación dada, dando lugar a que los ácidos fuertes (de tipo mineral) y los débiles (de tipo orgánico) ataquen las superficies metálicas y vayan causando el desprendimiento de particulas que originan pequeños cráteres que, al unirse, forman grietas que producen el rompimiento de la pieza. Por otro lado, las partículas desprendidas ocasionan desgaste abrasivo.

En los aceites para motores de combustión interna se puede presentar por dejar acabar la reserva alcalina del aceite, es decir, por el uso de éste más allá del kilometraje previsto. Esto se refleja mediante el análisis del TBN (Número Básico Total).

La herrumbre en un motor de combustión interna resulta casi enteramente del agua y de los ácidos provenientes de la cámara de combustión. En los motores Diesel la combustión de los compuestos de azufre produce ácido sulfúrico que ataca los anillos y las paredes del cilindro. De manera similar, el ataque de las partes ferrosas de un motor de gasolina se debe a los ácidos orgánicos y a los ácidos clorhídrico y bromhídrico, estos últimos proceden-

tes de los haluros orgánicos (dicloruro y dibromuro de etileno) usados junto con el compuesto antidetonante, con el fin de eliminar los residuos de plomo dejados al quemarse el combustible.

Dentro de las principales causas que originan el desgaste corrosivo en un motor de combustión interna, se tiene el funcionamiento a bajas temperaturas, lo cual ocasiona:

Contaminacion del aceite con los gases de la combustión y con el agua de condensación, dando lugar a la formación de lodos y de gomas, y a la dilución del aceite por el combustible.

Incremento en la herrumbre y en la corrosión de las superficies metálicas, propiciando la acumulación de focos de humedad y de agua, los cuales originan un desgaste pronunciado de los pistones, anillos, cilindros, cojinetes del cigüeñal, etc., producción de carbones duros (de tipo parafínico) al pasar aceite a la cámara de combustión, pegamento de anillos y mayor consumo de combustible, porque una gran parte de éste pasa al cárter sin quemarse y otra se emplea en vencer el aumento en la fricción.

Actualmente el problema de desgaste corrosivo en los motores de combustión interna se ha controlado considerablemente con las nuevas especificaciones API SG (para motores a gasolina) y CF (para motores Diesel).

Se ha demostrado que mientras las paredes del cilindro se mantengan por encima do los 180°F, el desgaste corrosivo es despreciable. A medida que la temperatura va disminuyendo el desgaste corrosivo aumenta marcadamente, debido a la condensación de gotitas de agua ácida. Por lo tanto, un motor se debe dejar funcionando en vacío durante el tiempo necesario, para que se alcance la temperatura normal de operación, de lo contrario, en unos pocos minutos puede ocurrir un considerable desgaste corrosivo.

Los ácidos débiles se forman a medida que el aceite se degrada y este es un fenómeno normal, mientras que los fuertes son ocasionados por una descomposición a altas temperaturas. Esta última situación es la que necesita máximo control (en el caso de los aceites industriales) para evitar el desgaste corrosivo.

El desgaste corrosivo en un motor de combusti6n interna se puede controlar mediante aditivos alcalinos, tales como fenatos y sulfonatos básicos. Se ha encontrado que en un motor Diesel se puede inhibir la corrosión debido al

ácido sulfúrico si el pH (acidez) del aceite se mantiene por encima de 4,5. En motores de gasolina que operan a baja temperatura (unos $90F$), el desgaste de los anillos y el cilindro aumenta rápidamente si el pH del aceite baja de 6.

Otro tipo de desgaste no menos peligroso es el corrosivo por vibración, en el cual el desprendimiento de material es causado por una carga cíclica que rompe la película lubricante. Si esta situación es inherente al funcionamiento del equipo (zarandas, molinos de bolas, de mandíbulas, etc.) este tipo de desgaste se puede evitar mediante el empleo de aditivos de Extrema Presión (EP) o con lubricantes de película sólida.

Erosivo

Es causado por un fluido a alta presión y con particulas sólidas en suspensión, las cuales al impactar sobre las superficies arrancan material. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. También se puede presentar como consecuencia del empleo de un aceite de viscosidad mayor que la requerida.

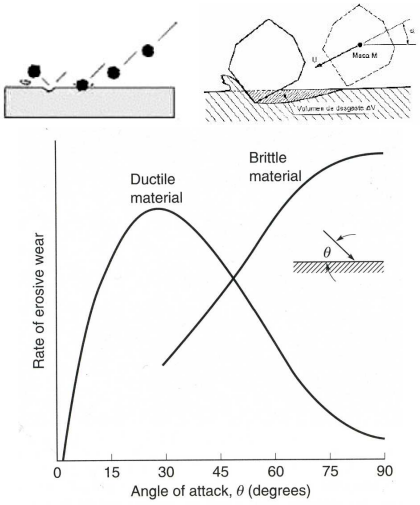


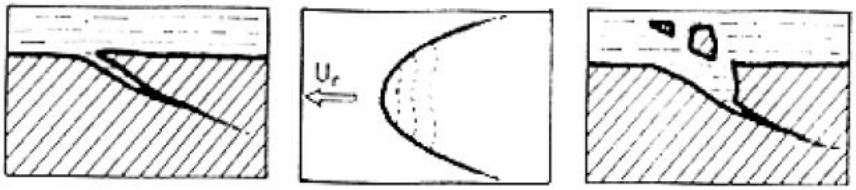
Figura 1.12: Forma en que actúa el desgaste erosivo y tasa de erosión según ángulo de impacto

El exceso de viscosidad hace que el aceite al circular entre dos superficies, entre las cuales hay una tolerancia específica, trate de pulir o emparejar

las irregularidades más sobresalientes. Este es el tipo de desgaste que se presenta cuando en el período inicial de la pucsta en marcha de un equipo nuevo se utiliza un aceite de una viscosidad mayor que la requerida para una operación normal.

Por fatiga superficial

Se presenta como consecuencia de los esfuerzos cíclicos de tensión, compresión y esfuerzo cortante sobre una superficie, los cuales dan como resultado grietas profundas de fatiga que causan finalmente la aparición de picaduras y de escamas. Se presenta principalmente en los mecanismos en donde intervienen el movimiento por rodadura, como es el caso de las pistas de los rodamientos, flancos de los dientes de los engranajes y superficies de las levas, entre otros. Este tipo de desgaste se presenta inexorablemenle con el tiempo.



Fisura inicial. Vista superior de la fisura. Cráter final.

Figura 1.13: Ejemplo de cómo evoluciona un desgaste debido a la presencia de fatiga

El desgaste por fatiga se puede acelerar cuando hay presencia en el aceite de partículas sólidas del mismo tamaño o ligeramente más grandes que el juego dinámico y que no se adhieren a ninguna de las superficies en movimiento. La partícula es atrapada instantáneamente entre las superficies y origina hendiduras en ellas, debido a que las superficies se deflectan a lado y lado de la partícula como consecuencia de la carga que soportan, iniciándose el agrietamiento.

La partícula es desalojada por el mismo movimiento de las superficies y después de n ciclos de fatiga las grietas se esparcen por las superficie hasta que se produce el *descascarillado* de la misma.

Por cavitacion

Cuando el aceite fluye a través de una región donde la presión es menor que la de su presión de vapor, hierve y forma burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el aceite hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido en forma súbita, *aplastándose* brúscamente las burbujas.

Este fenómeno se llama cavitación. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una superficie sólida cuando cambian de estado las fuerzas ejercidas por el aceite al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, que ocasionan picaduras en dicha superficie. La cavitación generalmente va acompañada de ruido y vibraciones.

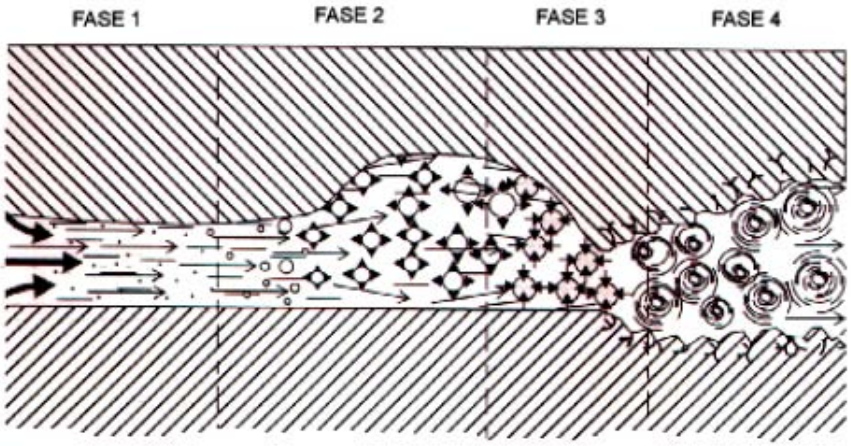


Figura 1.14: Esquema mostrando las diversas etapas que se manifiestan en un desgaste por cavitación

Cuando los aceites, se evaporan, las moléculas que escapan de su superficie ejercen una presión parcial en el espacio conocida como presión de vapor. Este fenómeno depende de la actividad molecular y ésta a su vez es función de la temperatura y aumenta con ella. Cuando la presión que actúa sobre un aceite es igual a su presión de vapor se presenta la ebullición. La cavitación se puede evitar incrementando la presión en el sistema o utilizando aceites con presiones de vapor bajas a altas temperaturas.

Por corrientes eléctricas

Se presenta como consecueneia del paso de corriente eléctrica a través de los elementos de una máquina, como en el caso de los rodamientos de un motor eléctrico, cuando la toma a tierra es defectuosa, o por corrientes parásitas en equipos rotatorios, como turbinas de vapor, de gas, hidraulicas y en compresores centrífugos.

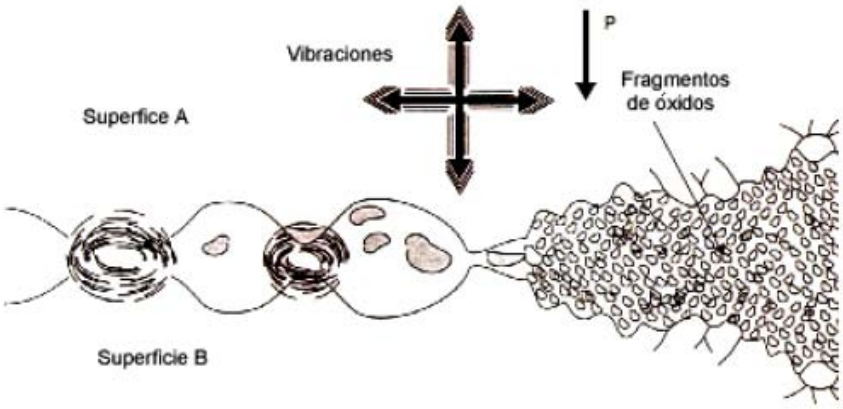


Figura 1.15: Etapas del cómo se genera el desgaste debido a la vibración entre dos superficies

En general los problemas ocasionados por el desgaste son:

- Mayor consumo de repuestos por aumento en las reparaciones y en el mantenimiento.
- Reducción en la producción por paros de maquinaria.
- Vida útil más corta de la maquinaria.
- En motores de combustion interna da lugar a pérdida de potencia, mayor consumo de combustible, etc.
- Posibilidad de accidentes ante el peligro de rotura de piezas al sobrepasar los límites permisibles de diseño.

Formas de reducir el desgaste

- Utilizando los lubricantes más apropiados para las diferentes condiciones de operación.

- Frecuencia de lubricación adecuada, con el fin de determinar los cambios de aceite y los reengrases correctos. Buenos programas de mantenimiento preventivo, incluyendo principalmente la limpieza y/o el cambio de los filtros de aire y de aceite.

- No sometiendo los equipos a condiciones diferentes a las de diseño.

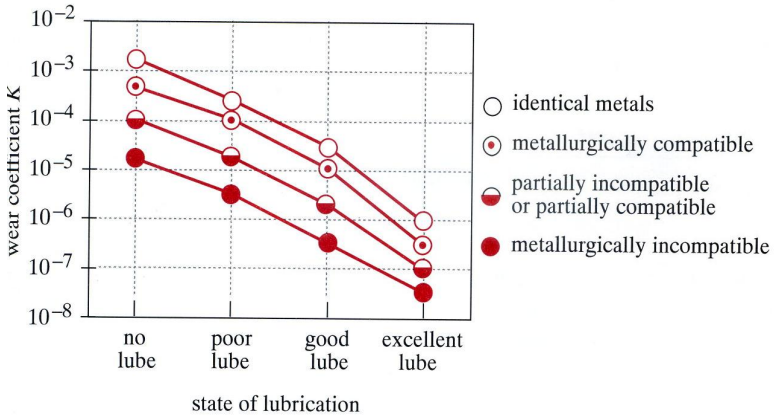


Figura 1.16: Coeficiente de desgaste adhesivo [4]

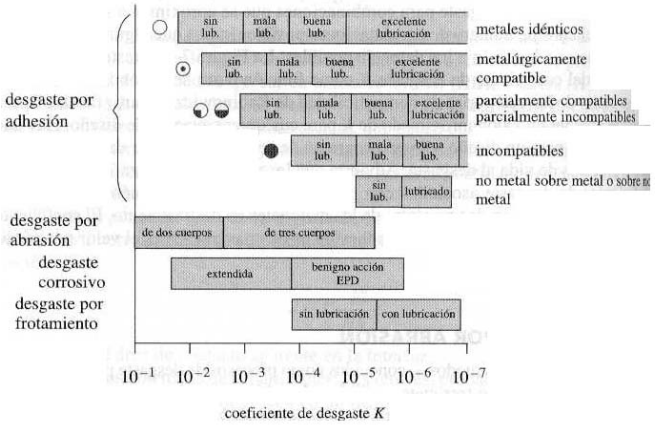


Figura 1.17: Coeficiente de desgaste abrasivo [4]

1.7. Cálculo desgaste

Existen un sin número de ecuaciones que intentan cuantificar las distintas formas de desgaste que existen. Por ejemplo en el caso de desgaste adhesivo se encuentran fórmulas de la forma:

$$V = K\frac{FL}{H}$$

donde V representa el volumen de material desgastado (más blando) en m^3, F es la fuerza normal al plano de desgaste en kgf, L longitud de deslizamiento en mm y H dureza en kg/mm^2. El factor de desgaste K se obtiene de la figura 1.16. Así la profundidad del desgaste d se puede evaluar de la forma:

$$d = K\frac{FL}{HA_{aparente}}$$

Para el desgaste abrasivo se pueden encontrar fórmulas tales como:

$$V_{abras} = K\frac{FL}{H}$$

donde K se obtiene ahora de la gráfica de la figura 1.17

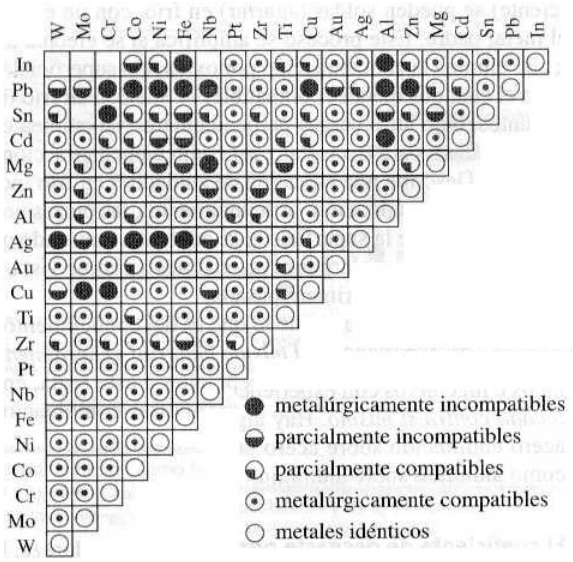


Figura 1.18: Compatibilidad metalúrgica entre metales

La figura 1.18 expresa la compatibilidad entre los materiales respecto al desgaste. Los círculos negros representan una mejor interacción entre los metales y la tendencia hacia el punto en blanco indican que tienden a adherirse.

Desgaste primario	Desgaste secundario
Desgaste por abrasión. Desgaste por erosión. Desgaste por adhesión y deslizamiento. Desgaste por fatiga. Desgaste por corrosión.	Desgaste por vibración. Desgaste por cavitación. Desgaste por fenómenos eléctricos

Figura 1.19: Clasificación de los tipos de desgaste

Elemento	Desgaste abrasivo	Desgaste erosivo	Desgaste adhesivo	Desgaste por fatiga	Desgaste corrosivo
Camisas, segmentos, pistones.	X		X		X
Levas, empujadores, balancines.	X		X	X	X
Vástago-guía de válvula	X		X		
Apoyo asiento de válvula	X	X			
Engranajes de distribución	X		X	X	
Muñones	X	X		X	X
Cojinetes	X	X			X
Bomba de aceite	X		X	X	
Bomba de combustible	X		X	X	

Figura 1.20: Tipos de desgaste presentes en un motor

Capítulo 2

Propiedades de los lubricantes

2.1. Viscosidad del aceite

Diferentes aceites tienen diferentes viscosidades. Adicionalmente la viscosidad del aceite cambia con la temperatura, el corte, la presión y el espesor de la película de aceite generada. La figura 2.1 representa la forma en que las capas entre fluido tienden a moverse en forma relativa. Ese efecto permite entender el concepto de viscosidad en un fluído.

2.1.1. Viscosidad dinámica

Considerando 2 placas separadas por un fluido una distancia h según lo mostrado en la figura 2.1, la fuerza requerida para mover la superficie superior es proporcional al área A y a la velocidad u, e inversamente proporcional a la separación de las placas, es decir:

$$F \alpha \frac{Au}{h}$$

Esta relación es válida para muchos fluidos, los cuales muestran diferentes constantes de proporcionalidad η denominada viscosidad dinámica, por lo que se puede escribir de la forma:

$$F = \eta Au/h$$

O reordenando se escribe: $\eta = (F/A)/(U/h) = \tau/(u/h)$, donde:

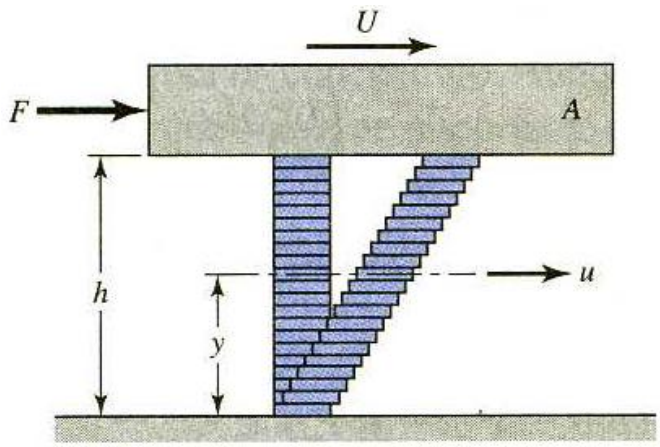


Figura 2.1: Deslizamiento de capas en un fluído [5]

η es la viscosidad dinámica ($Pa \cdot s$),

τ es el esfuerzo de corte actuando sobre el fluido (Pa),

u/h es la razón de corte, es decir, el gradiente de velocidad normal a τ: (s^{-1})

Antes de usar el sistema SI de unidades, se usaba en $Poise$ (P) o el $CentiPoise$ (cP) como unidad de la viscosidad:

$$1P = 100cP \approx 0{,}1Pa \cdot s$$

$$1cP = 1{,}019x10^{-8} \quad \frac{kgf - s}{cm^2}$$

$\frac{lbf-s}{in^2} = 1Re$ (Reynold) ; $1P = \frac{dina-s}{cm^2}$

2.1.2. Viscosidad cinemática

Se define como la razón entre la viscosidad cinemática y la densidad del fluido:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

ν es la viscosidad cinemática (m^2/s) y ρ es la densidad del fluido (kg/m^3). Es común usar como unidad de medida para la viscosidad cinemática el Stoke (S) o el centiStoke (cS):

$$1S = 100cS = 0{,}0001 \quad m^2/s$$

Las densidades de aceites lubricantes usualmente están en el rango de $700 - 1200\ kg/m^3$ ($0{,}7 - 1{,}2\ gr/cm^3$). Densidades típicas de aceites minerales es del orden de $850 kg/m^3$ ($0{,}85 gr/cm^3$).

Viscosidad en cP = viscosidad en cS x densidad en gr/cm^3.

Clase de viscosidad de acuerdo con ISO	Viscosidad cinemática mm^2/s a 40 °C valor medio	mín	máx	Clase de viscosidad de acuerdo con ISO	Viscosidad cinemática mm^2/s a 40 °C valor medio	mín	máx
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42	ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52	ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06	ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48	ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 10	10	9,00	11,0	ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 15	15	13,5	16,5	ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 22	22	19,8	24,2	ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 32	32	28,8	35,2	ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 46	46	41,4	50,6	ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

Figura 2.2: Viscosidad en escala ISO. Unidades en mm^2/s

2.1.3. Relación Viscosidad - Temperatura

La viscosidad de un lubricante es extremadamente sensible a la temperatura de operación. Al incrementar la temperatura la viscosidad disminuye rápidamente. En algunos casos la viscosidad puede caer hasta en un 80 % al aumentar la temperatura en $25C$. Es importante conocer la viscosidad en el punto de operación, ya que ella determina el espesor de la película lubricante que separa las dos superficies. La figura 2.4 muestra la variación de la viscosidad de algunos aceites según especificación ISO.

2.1.4. Indice de viscosidad

En 1929 fue desarrollado un índice de viscosidad (Viscosity Index) VI. Es un parámetro empírico que compara la viscosidad cinemática de un aceite con otro de referencia. Los aceites de referencia se han seleccionado de manera que tengan un índice de viscosidad igual a cero (VI=0) y otros con $VI = 100$ a $100F$ ó ($37{,}8C$) pero tienen la misma viscosidad que el aceite de interés a $210F$ ($98{,}89C$).

Ya que los aceites de Pensilvania y de la costa del Golfo tienen la misma viscosidad a 210ºF (98.9ºC) se seleccionaron como aceites de referencia. El aceite hecho con el crudo de Pensilvania se le asignó un VI = 100, mientras

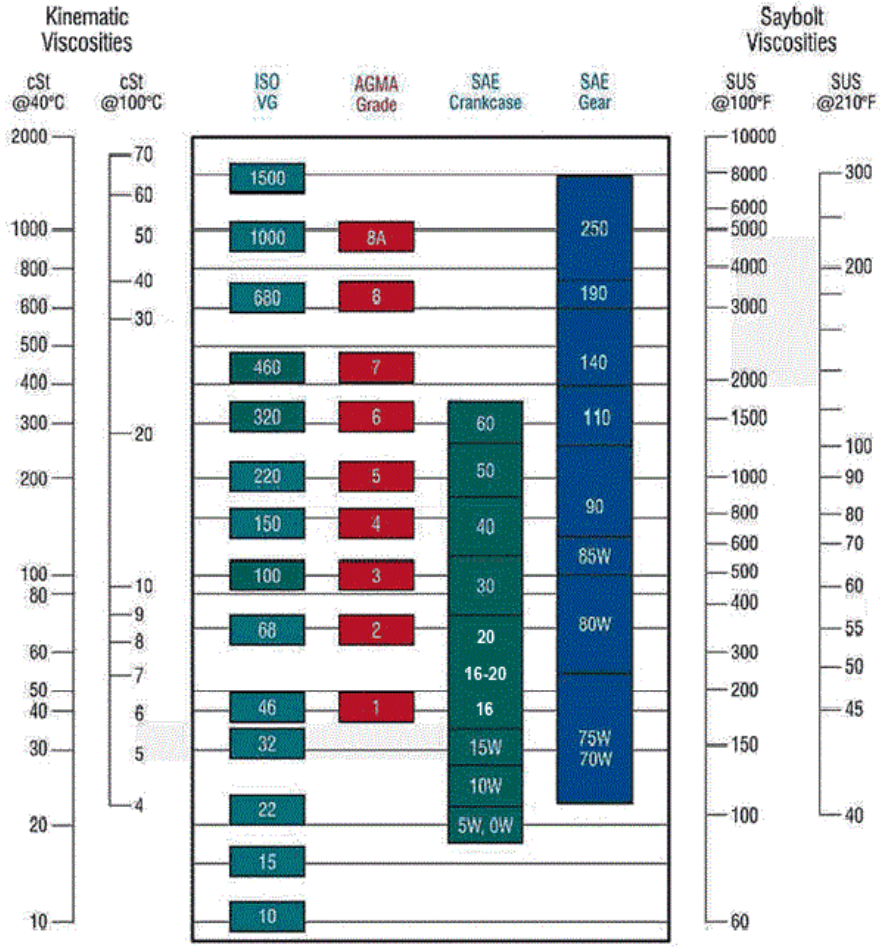


Figura 2.3: Escalas de viscosidad usadas en la práctica

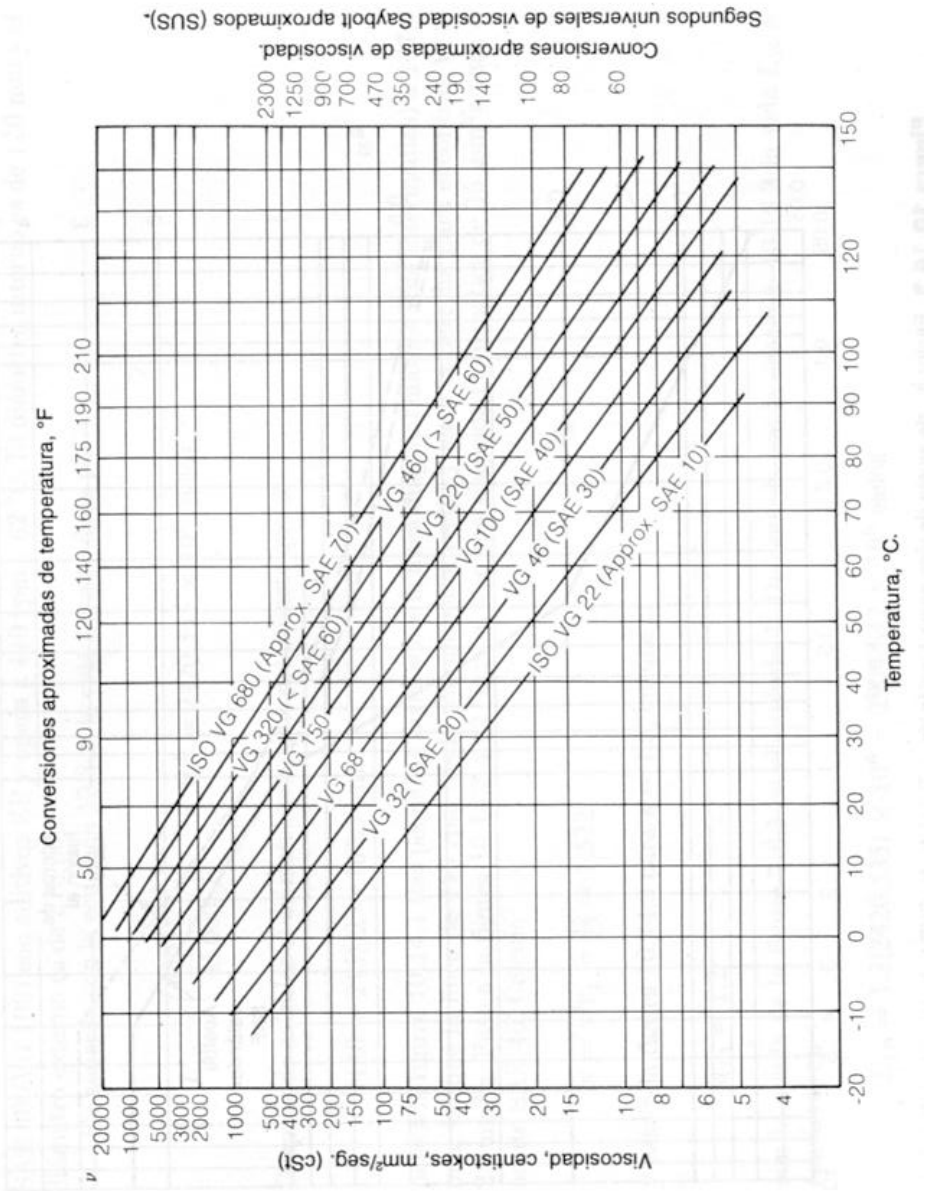


Figura 2.4: Viscosidades versus temperatura

que el hecho con el crudo del Golfo una VI = 0. El índice de viscosidad se puede calcular a partir de la expresión:

$$VI = 100(L - U)/(L - H)$$

Este índice es muy usado para analizar el estado del lubricante, tal como se puede ver por ejemplo en la figura 2.5.

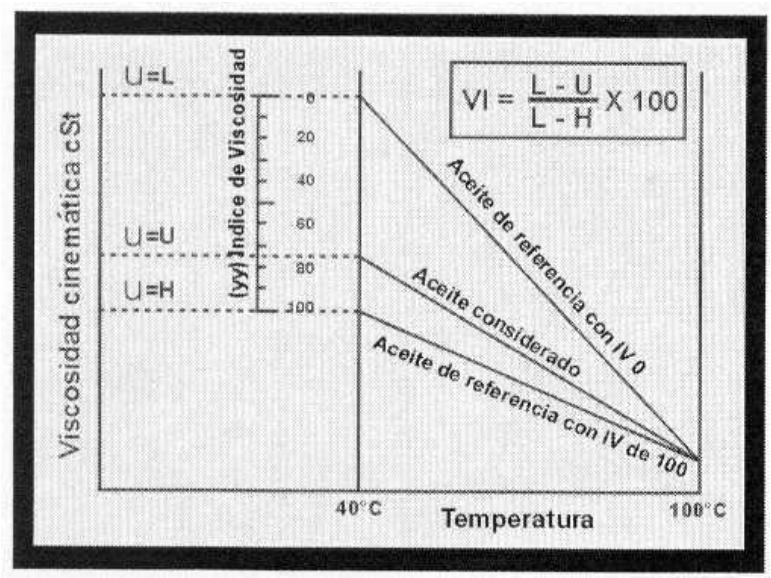


Figura 2.5: Valores de viscosidad para cálculo de IV

Primero la viscosidad cinemática del aceite de interés se mide a $40C$ (U) y a $100C$. A partir de la Tabla de la figura 2.6 se observa que la viscosidad a 100°C del aceite de interés le corresponden valores del aceite de referencia L y H. Ellos se introducen en la fórmula.

EJEMPLOS:
Encontrar el índice de viscosidad de un aceite que tiene una viscosidad cinemática a $40C$ de $\nu_{40} = 135cS$ y a $100C$ de $\nu_{100} = 17cS$.

2.1.5. Relación de corte - viscosidad

Desde el punto de vista de ingeniería es de fundamental importancia conocer la viscosidad del lubricante a una razón de corte específica. Por razones de simplificación, usualmente se supone que el fluido tiene un comportamiento Newtoniano, es decir su viscosidad es proporcional a la razón de corte, de acuerdo a lo mostrado en la figura 2.8a. Comportamientos no Newtonianos de algunos fluidos selectos se muestran en la figura 2.8b.

Cuadro 2.1: Estableciendo límites en los cambios de viscosidad

Límite	Aceites de motor	Aceites industriales	Aceites industriales en ambientes severos
Crítico (superior)	+20 %	+10 %	+ 7 %
Precaución (superior)	+10 %	+5 %	+ 4 %
Precaución (inferior)	- 5 %	- 5 %	- 5 %
Crítico (inferior)	-10 %	-10 %	-10 %

2.1.6. Mezcla de viscosidad

En la industria es común y necesario mezclar dos fluidos similares de diferentes viscosidades de manera de alcanzar una mezcla con una viscosidad adecuada. La pregunta es: ¿Podemos mezclar un fluido A con un fluido B?. Se usa para ello la carta ASTM mostrada en la figura 2.11. En el ejemplo que aparece en la figura, 20 % del fluido menos viscoso es mezclado con un 80 % de un fluido más viscoso, obteniendo la viscosidad requerida. En general la mezcla de aceites está muy limitada por la compatibilidad de los aceites bases y/o aditivos, por lo que se restringe sólo a aceites de igual marca y aditivos compatibles entre sí. La figura 2.12 permite mezclar aceites y entregar una buena estimación de la viscosidad resultante. La figura 2.13 permite obtener de forma aproximada el punto de inflamación de un aceite que se forma de la mezcla de otros dos compatibles.

υ_{100}	L	H	υ_{100}	L	H	υ_{100}	L	H	υ_{100}	L	H	υ_{100}	L	H
2.00	7.994	6.394	8.30	106.9	63.05	14.6	283.0	143.9	21.8	575.6	261.5	41.0	1810	676.6
2.10	8.640	6.894	8.40	109.2	64.18	14.7	286.4	145.3	22.0	585.2	264.9	41.5	1851	689.1
2.20	9.309	7.410	8.50	111.5	65.32	14.8	289.7	146.8	22.2	595.0	268.6	42.0	1892	701.9
2.30	10.00	7.944	8.60	113.9	66.48	14.9	293.0	148.2	22.4	604.3	272.3	42.5	1935	714.9
2.40	10.71	8.496	8.70	116.2	67.64	15.0	296.5	149.7	22.6	614.2	275.8	43.0	1978	728.2
2.50	11.45	9.063	8.80	118.5	68.79	15.1	300.0	151.2	22.8	624.1	279.6	43.5	2021	741.3
2.60	12.21	9.647	8.90	120,9	69.94	15.2	303.4	152.6	23.0	633.6	283.3	44.0	2064	754.4
2.70	13.00	10.25	9.00	123.3	71.10	15.3	306.9	154.1	23.2	643.4	286.8	44.5	2108	767.6
2.80	13.80	10.87	9.10	125.7	72.27	15.4	310.3	155.6	23.4	653.8	290.5	45.0	2152	780.9
2.90	14.63	11.50	9.20	128.0	73.42	15.5	313.9	157.0	23.6	663.3	294.4	45.5	2197	794.5
3.00	15.49	12.15	9.30	130.4	74.57	15.6	317.5	158.6	23.8	673.7	297.9	46.0	2243	808.2
3.10	16.36	12.82	9.40	132.8	75.73	15.7	321.1	160.1	24.0	683.9	301.8	46.5	2288	821.9
3.20	17.26	13.51	9.50	135.3	76.91	15.8	324.6	161.6	24.2	694.5	305.6	47.0	2333	835.5
3.30	18.18	14.21	9.60	137.7	78.08	15.9	328.3	163.1	24.4	704.2	309.4	47.5	2380	849.2
3.40	19.12	14.93	9.70	140.1	79.27	16.0	331.9	164.6	24.6	714.9	313.0	48.0	2426	863.0
3.50	20.09	15.66	9.80	142.7	80.46	16.1	335.5	166.1	24.8	725.7	317.0	48.5	2473	876.9
3.60	21.08	16.42	9.90	145.2	81.67	16.2	339.2	167.7	25.0	736.5	320.9	49.0	2521	890.9
3.70	22.09	17.19	10.0	147.7	82.87	16.3	342.9	169.2	25.2	747.2	324.9	49.5	2570	905.3
3.80	23.13	17.97	10.1	150.3	84.08	16.4	346.6	170.7	25.4	758.2	328.8	50.0	2618	919.6
3.90	24.19	18.77	10.2	152.9	85.30	16.5	350.3	172.3	25.6	769.3	332.7	50.5	2667	933.6
4.00	25.32	19.56	10.3	155.4	86.51	16.6	354.1	173.8	25.8	779.7	336.7	51.0	2717	948.2
4.10	26.50	20.37	10.4	158.0	87.72	16.7	358.0	175.4	26.0	790.4	340.5	51.5	2767	962.9
4.20	27.75	21.21	10.5	160.6	88.95	16.8	361.7	177.0	26.2	801.6	344.4	52.0	2817	977.5
4.30	29.07	22.05	10.6	163.2	90.19	16.9	365.6	178.6	26.4	812.8	348.4	52.5	2867	992.1
4.40	30.48	22.92	10.7	165.8	91.40	17.0	369.4	180.2	26.6	824.1	352.3	53.0	2918	1007
4.50	31.96	23.81	10.8	168.5	92.65	17.1	373.3	181.7	26.8	835.5	356.4	53.5	2969	1021
4.60	33.52	24.71	10.9	171.2	93.92	17.2	377.1	183.3	27.0	847.0	360.5	54.0	3020	1036
4.70	35.13	25.63	11.0	173.9	95.19	17.3	381.0	184.9	27.2	857.5	364.6	54.5	3073	1051
4.80	36.79	26.57	11.1	176.6	96.45	17.4	384.9	186.5	27.4	869.0	368.3	55.0	3126	1066
4.90	38.50	27.53	11.2	179.4	97.71	17.5	388.9	188.1	27.6	880.6	372.3	55.5	3180	1082
5.00	40.23	28.49	11.3	182.1	98.97	17.6	392.7	189.7	27.8	892.3	376.4	56.0	3233	1097
5.10	41.99	29.46	11.4	184.9	100.2	17.7	396.7	191.3	28.0	904.1	380.6	56.5	3286	1112
5.20	43.76	30.43	11.5	187.6	101.5	17.8	400.7	192.9	28.2	915.8	384.6	57.0	3340	1127
5.30	45.53	31.40	11.6	190.4	102.8	17.9	404.6	194.6	28.4	927.6	388.8	57.5	3396	1143
5.40	47.31	32.37	11.7	193.3	104.1	18.0	408.6	196.2	28.6	938.6	393.0	58.0	3452	1159
5.50	49.09	33.34	11.8	196.2	105.4	18.1	412.6	197.8	28.8	951.2	396.6	58.5	3507	1175
5.60	50.87	34.32	11.9	199.0	106.7	18.2	416.7	199.4	23.0	963.4	401.1	59.0	3563	1190
5.70	52.64	35.29	12.0	201.9	108.0	18.3	420.7	201.0	29.2	975.4	405.3	59.5	3619	1206
5.80	54.42	36.26	12.1	204.8	109.4	18.4	424.9	202.6	29.4	987.1	409.5	60.0	3676	1222
5.90	56.20	37.23	12.2	207.8	110.7	18.5	429.0	204.3	29.6	998.9	413.5	60.5	3734	1238
6.00	57.97	38.19	12.3	210.7	112.0	18.6	433.2	205.9	29.8	1011	417.6	61.0	3792	1254
6.10	59.74	39.17	12.4	213.6	113.3	18.7	437.3	207.6	30.0	1023	421.7	61.5	3850	1270
6.20	61.52	40.15	12.5	216.6	114.7	18.8	441.5	209.3	30.5	1055	432.4	62.0	3908	1286
6.30	63.32	41.13	12.6	219.6	116.0	18.9	445.7	211.0	31.0	1086	443.2	62.5	3966	1303
6.40	65.18	42.14	12.7	222.6	117.4	19.0	449.9	212.7	31.5	1119	454.0	63.0	4026	1319
6.50	67.12	43.18	12.8	225.7	118.7	19.1	454.2	214.4	32.0	1151	464.9	63.5	4087	1336
6.60	69.16	44.24	12.9	228.8	120.1	19.2	458.4	216.1	32.5	1184	475.9	64.0	4147	1352
6.70	71.29	45.33	13.0	231.9	121.5	19.3	462.7	217.7	33.0	1217	487.0	64.5	4207	1369
6.80	73.48	46.44	13.1	235.0	122.9	19.4	467.0	219.4	33.5	1251	498.1	65.0	4268	1386
6.90	75.72	47.51	13.2	238.1	124.2	19.5	471.3	221.1	34.0	1286	509.6	65.5	4329	1402
7.00	78.00	48.57	13.3	241.2	125.6	19.6	475.7	222.8	34.5	1321	521.1	66.0	4392	1419
7.10	80.25	49.61	13.4	244.3	127.0	19.7	479.7	224.5	35.0	1356	532.5	66.5	4455	1436
7.20	82.39	50.69	13.5	247.4	128.4	19.8	483.9	226.2	35.5	1391	544.0	67.0	4517	1454
7.30	84.53	51.78	13.6	250.6	129.8	19.9	488.6	227.7	36.0	1427	555.6	67.5	4580	1471
7.40	86.66	52.88	13.7	253.8	131.2	20.0	493.2	229.5	36.5	1464	567.1	68.0	4645	1488
7.50	88.85	53.98	13.8	257.0	132.6	20.2	501.5	233.0	37.0	1501	579.3	68.5	4709	1506
7.60	91.04	55.09	13.9	260.1	134.0	20.4	510.8	236.4	37.5	1538	591.3	69.0	4773	1523
7.70	93.20	56.20	14.0	263.3	135.4	20.6	519.9	240.1	38.0	1575	603.1	69.5	4839	1541
7.80	95.43	57.31	14.1	266.6	136.8	20.8	528.8	243.5	38.5	1613	615.0	70.0	4905	1558
7.90	97.72	58.45	14.2	269.8	138.2	21.0	538.4	247.1	39.0	1651	627.1			
8.00	100.0	59.60	14.3	273.0	139.6	21.2	547.5	250.7	39.5	1691	639.2			
8.10	102.3	60.74	14.4	276.3	141.0	21.4	556.7	254.2	40.0	1730	651.8			
8.20	104.6	61.89	14.5	279.6	142.4	21.6	566.4	257.8	40.5	1770	664.2			

Figura 2.6: Valores de viscosidad a 100ºC para cálculo de IV

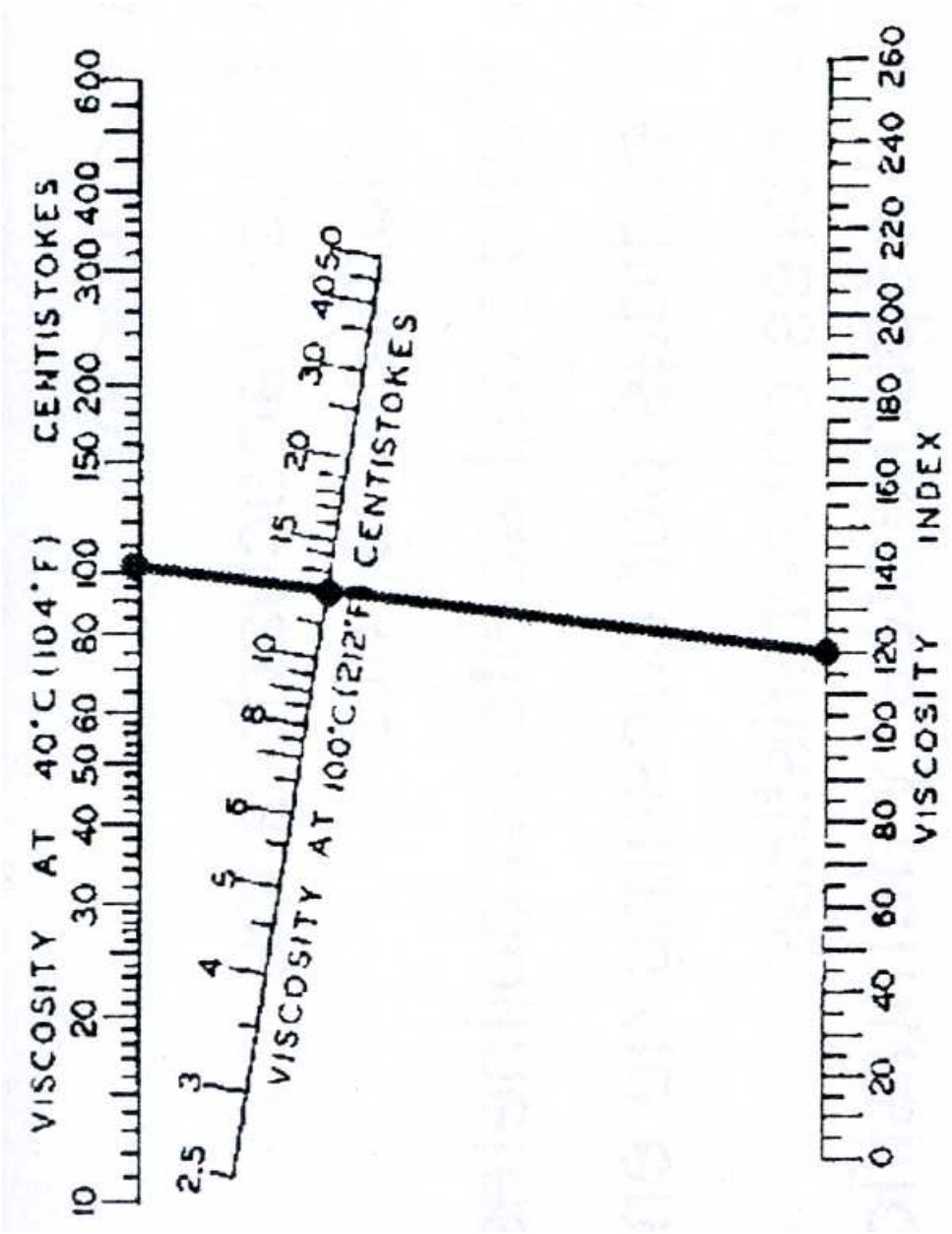


Figura 2.7: Cálculo de índice de viscosidad usando nomograma

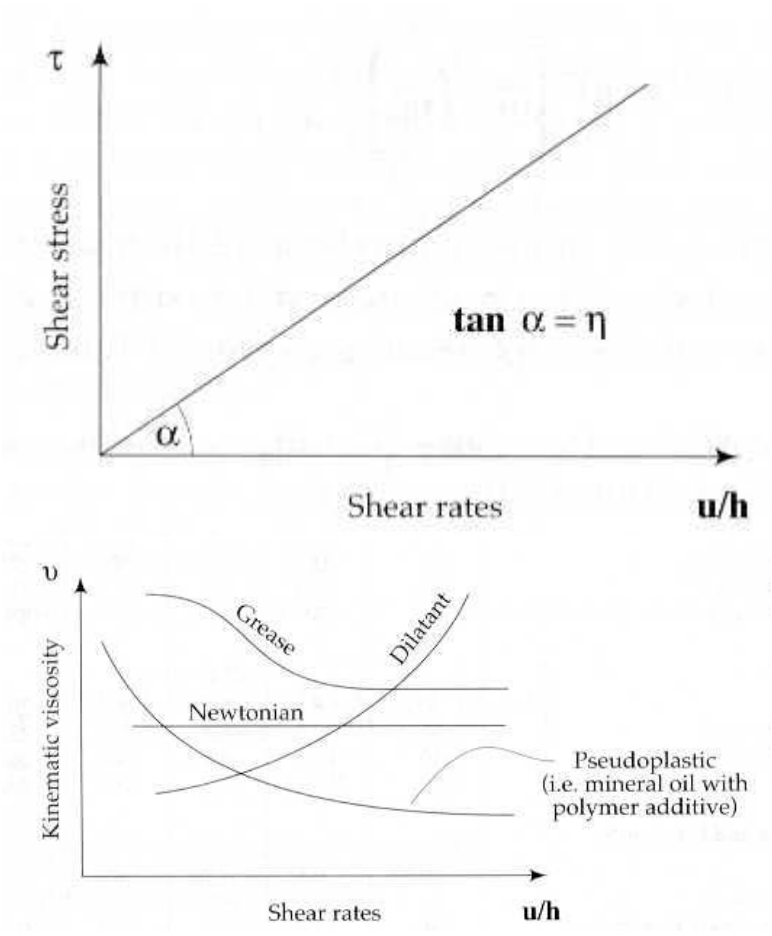


Figura 2.8: a. Fluido con comportamiento Newtoniano, b. Fluidos con comportamiento No-Newtoniano

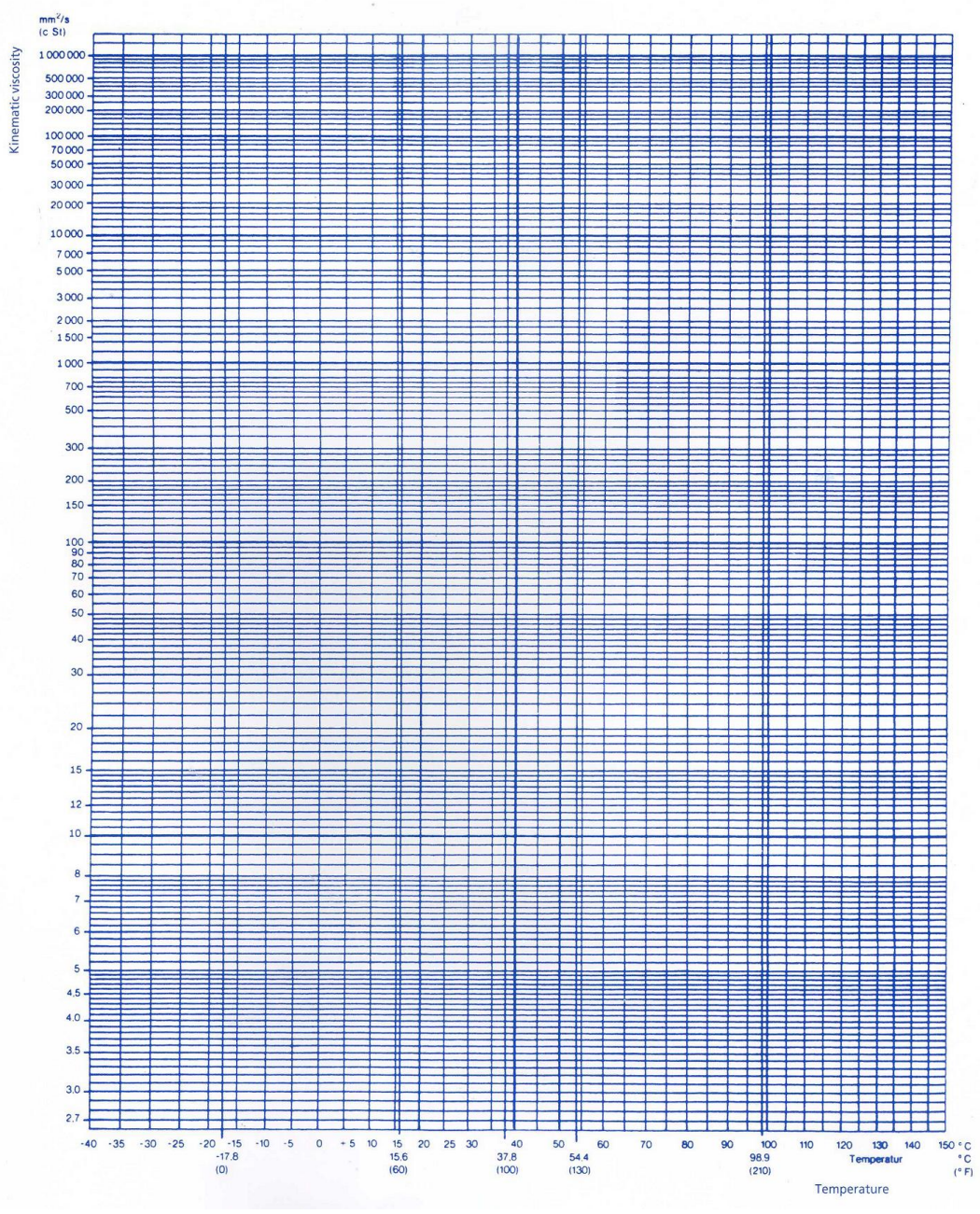


Figura 2.9: Gráfico viscosidad temperatura. Ejercicios

	Descenso de Viscosidad	Aumento de Viscosidad
Cambios en la estructura del lubricante	Ruptura de las moléculas. Degradación de los aditivos modificadores del IV.	Polimerizaciones. Oxidación. Pérdidas por evaporación. Formación de lodos y lacas.
Contaminación	Combustible. Disolventes. Mezcla de aceite (de viscosidad inferior).	Agua (emulsiones). Espumas. Insolubles. Mezcla con aceite de viscosidad superior.

Figura 2.10: Parámetros que alteran el valor de la viscosidad

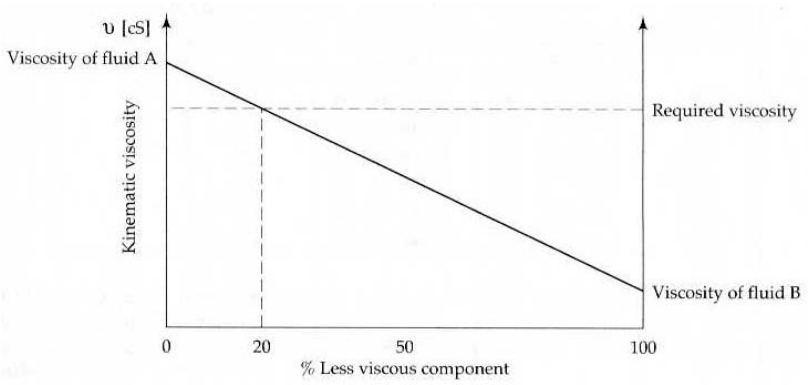


Figura 2.11: Mezcla de aceites

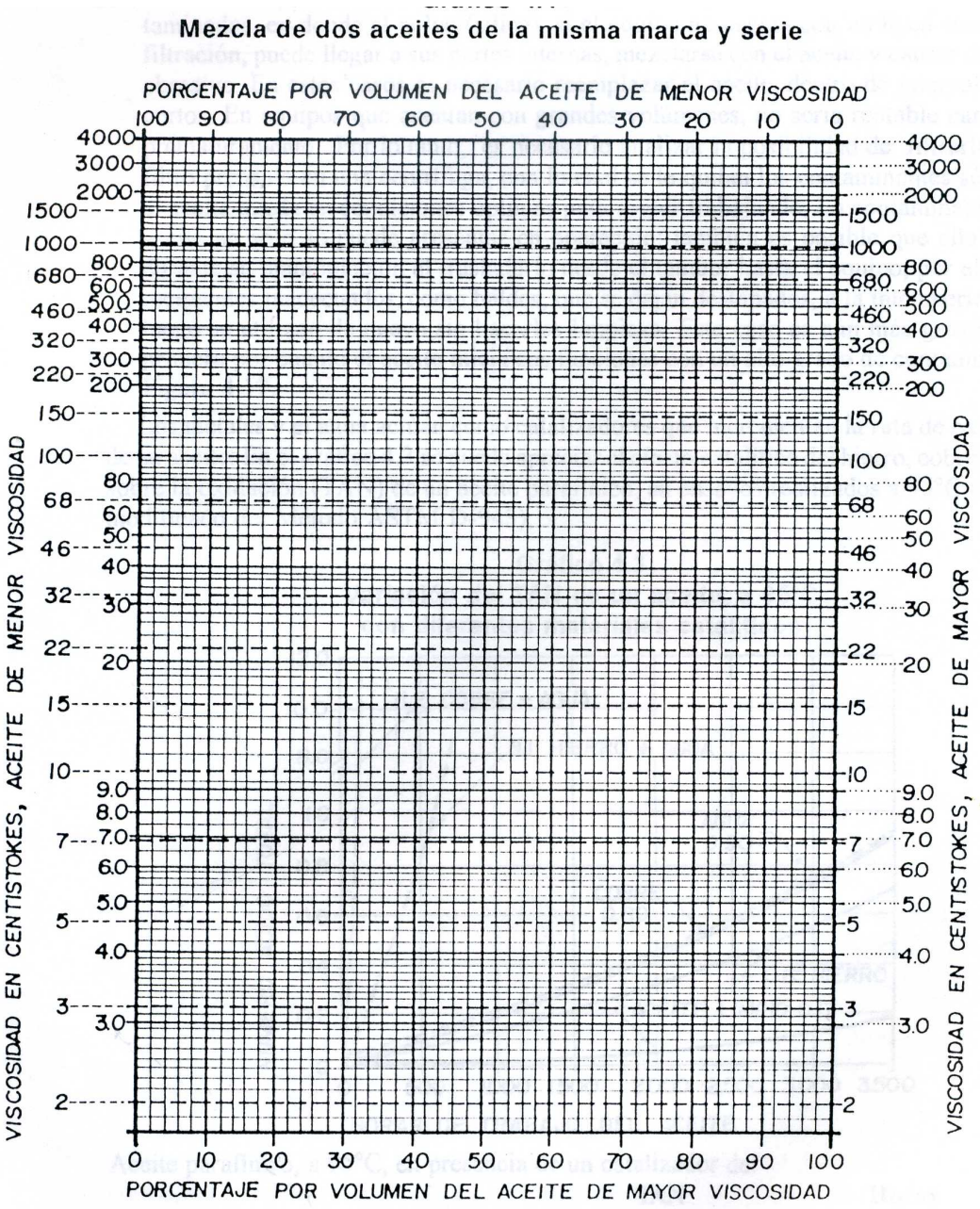


Figura 2.12: Mezcla aceites de igual marca y serie. Ejercicios

2.1.7. Viscosidad del aceite

Existe una amplia gama de sistemas de clasificación de la viscosidad. Los más usados son el de la SAE (Society of Automotive Engineers), y la de ISO (International Organization for Stardarization).

Clasificación SAE

Los aceites usados en motores de combustión y transmisiones de potencia son graduados de acuerdo a la clasificación SAE J300 y SAE J306 respectivamente. Una reciente clasificación SAE establece once aceites de motores y siete grados de aceites de transmisión. Las viscosidades de los diferentes aceites de motor según SAE están dadas en la Tabla mostrada en la figura 2.14.

Notar que la viscosidad en la columna 2 es la viscosidad dinámica mientras la columna 3 muestra la viscosidad cinemática. Los aceites sin el sufijo W son llamados aceites monogrados. Los aceites con sufijo W (Winter - invierno) muestran buenas capacidades de partida en frio. Para climas donde la temperatura regularmente cae bajo cero C, aceites de motores y transmisiones son formulados de manera de dar una baja resistencia en la partida, esto es, su viscosidad es baja en la partida.

Tales aceites tienen un alto índice de viscosidad alcanzando una alta viscosidad mejorada con aditivos poliméricos. Tales aceites son denominados *aceites multigrado*. Por ejemplo un SAE 20W50 tiene una viscosidad SAE 20 a -18ºC y una viscosidad SAE 50 a 100 ºC, tal como se puede visualizar en la figura .

La clasificación SAE para aceites de transmisión es muy similar al usado en aceites de motores. La diferencia es que el grado de invierno (Winter) está definido por la temperatura a la cual el aceite alcanza la viscosidad de 150,000cP. Esta es la máxima viscosidad del aceite a la cual se puede usar sin causar daño a los engranajes. La clasificación también permite el concepto de multigrado. La tabla que muestra la figura 2.16 muestra grados de viscosidad SAE para aceites de transmisión.

Se debe notar que los aceites de transmisión tienen mayor número de clasificación que los aceites de motores. Tal como se ve en la figura 2.17, esto no significa que ellos sean más viscosos que los aceites de motores.

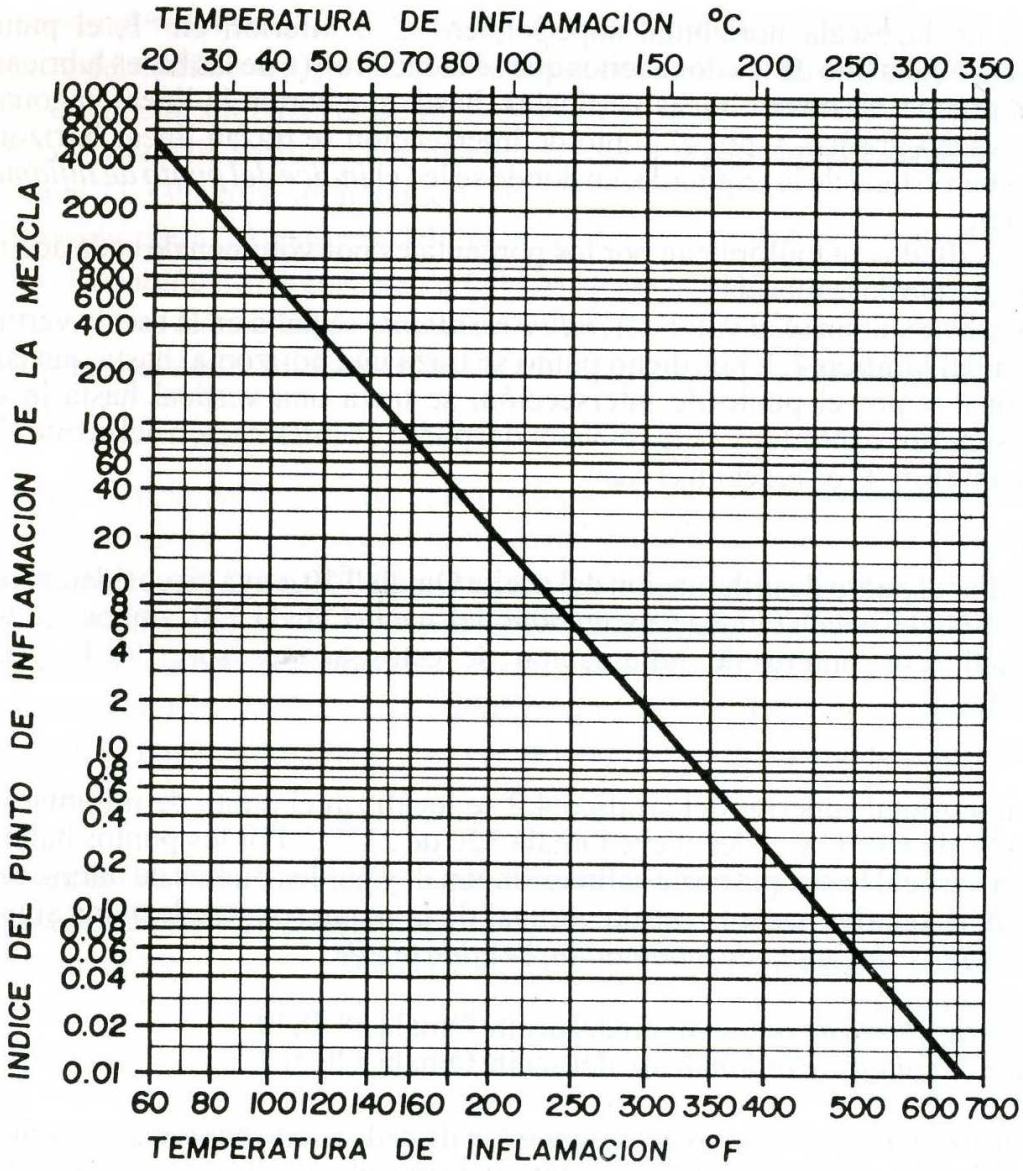


Figura 2.13: Gráfico que permite cuantificar aproximadamente el punto de inflamación de dos aceites compatibles que se mezclan

SAE viscosity grade	Viscosity [cP] at temp [°C] max		Kinematic viscosity [cS] at 100°C	
	Cranking	Pumping	min	max
0W	3 250 at -30	30 000 at -35	3.8	-
5W	3 500 at -25	30 000 at -30	3.8	-
10W	3 500 at -20	30 000 at -25	4.1	-
15W	3 500 at -15	30 000 at -20	5.6	-
20W	4 500 at -10	30 000 at -15	5.6	-
25W	6 000 at -5	30 000 at -10	9.3	-
20	-	-	5.6	< 9.3
30	-	-	9.3	< 12.5
40	-	-	12.5	< 16.3
50	-	-	16.3	< 21.9
60	-	-	21.9	< 26.1

Figura 2.14: Clasificación SAE para aceites de motor

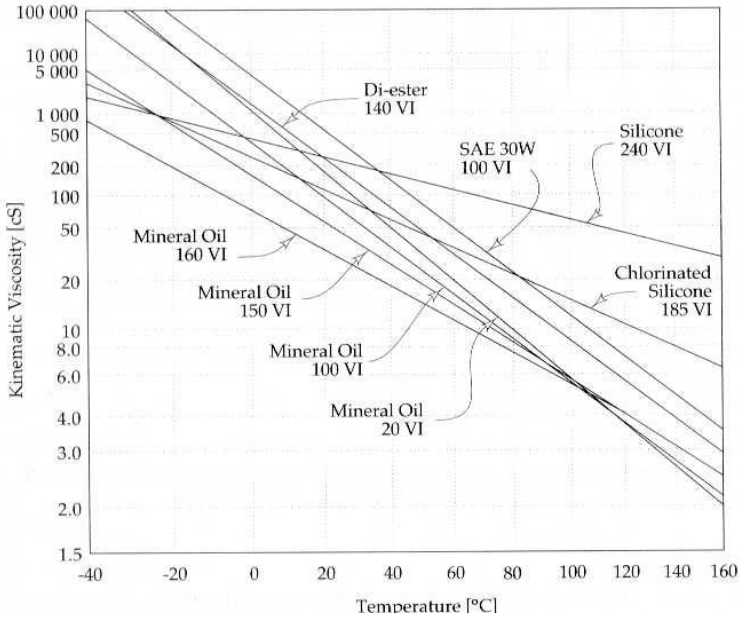


Figura 2.15: Gráfico viscosidad temperatura para algunos aceites multi y mono grado

SAE viscosity grade	Max. temp. for viscosity of 150 000 cP [°C]	Kinematic viscosity [cS] at 100°C	
		min	max
70W	-55	4.1	-
75W	-40	4.1	-
80W	-26	7.0	-
85W	-12	11.0	-
90	-	13.5	< 24.0
140	-	24.0	< 41.0
250	-	41.0	-

Figura 2.16: Clasificación SAE para aceites de transmisión

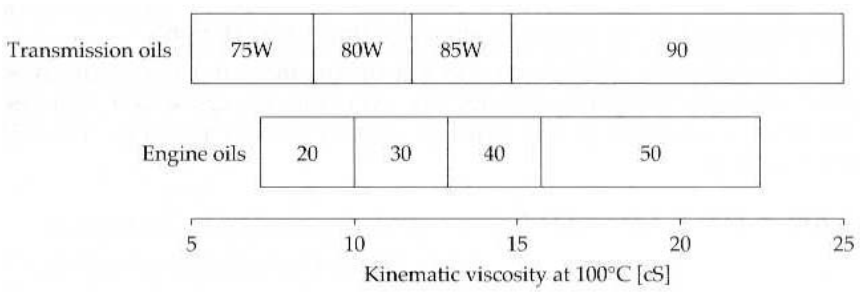


Figura 2.17: Comparación de grados SAE para aceites de motores y de transmisión

Clasificación ISO

Este sistema fue desarrollado en USA por la American Society of Lubrication Engineers (ASLE) y en Inglaterra por la British Standarts Institution (BSI) para todos los fluidos lubricantes industriales. Es comúnmente usado en la industria. Las viscosidades de aceites industriales para diferentes viscosidades según ISO están dadas en la Tabla de la figura 2.18. (ISO 3448).

ISO viscosity grade	Kinematic viscosity limits [cSt] at 40°C		
	min.	midpoint	max.
ISO VG 2	1.98	2.2	2.42
ISO VG 3	2.88	3.2	3.52
ISO VG 5	4.14	4.6	5.06
ISO VG 7	6.12	6.8	7.48
ISO VG 10	9.00	10	11.0
ISO VG 15	13.5	15	16.5
ISO VG 22	19.8	22	24.2
ISO VG 32	28.8	32	35.2
ISO VG 46	41.4	46	50.6
ISO VG 68	61.2	68	74.8
ISO VG 100	90.0	100	110
ISO VG 150	135	150	165
ISO VG 220	198	220	242
ISO VG 320	288	320	352
ISO VG 460	414	460	506
ISO VG 680	612	680	748
ISO VG 1000	900	1000	1100
ISO VG 1500	1350	1500	1650

Figura 2.18: Clasificación ISO para aceites industriales

2.1.8. Densidad y gravedad específica

La densidad del lubricante a veces ofrece una manera simple de identificarlos. La densidad o gravedad específica además se usa para caracterizar aceites crudos. Ello da una leve idea de la cantidad de gasolina y kerosene presente en el crudo. La gravedad específica se define como la razón de masa de un volumen dado de aceite a temperatura t_1, a la masa de igual cantidad de volumen de agua pura a temperatura t_2 (ASTM D941, D1217, D1298). Para productos del petróleo la gravedad específica es usualmente dada u-

sando la temperatura de $60F$ (15,6C).

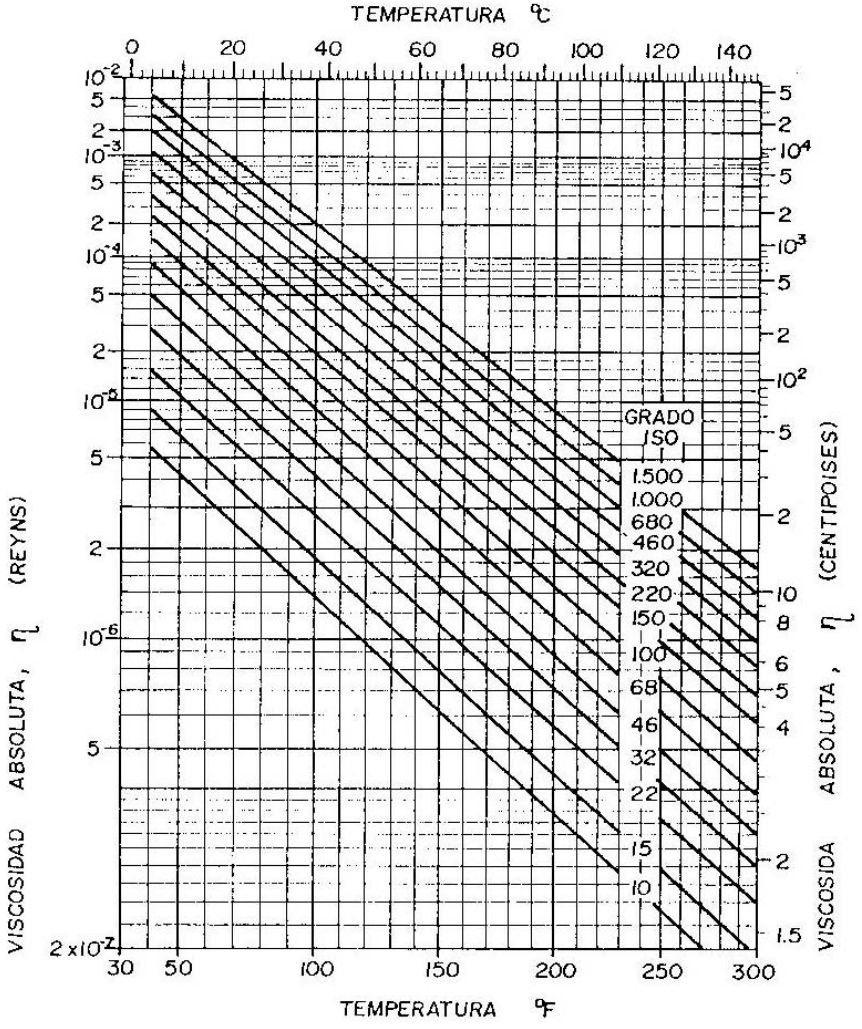


Figura 2.19: Temperatura - viscosidad en grados ISO

Para los aceites lubricantes derivados del petróleo, se considera la densidad aproximadamente igual al peso específico. La densidad es la masa de un volumen de aceite dado (kg/m^3). En la industria del petróleo se usa la unidad API (American Petroleum Institute) como un derivado de la gravedad

específica convencional. Ella se define como:

$$API = (141{,}5/s) - 131{,}5$$

Donde s es la gravedad específica a $15{,}6C$ $(60F)$. La densidad típica de un aceite mineral es del orden de $850kg/m^3$ y ya que la densidad del agua es alrededor de $1000kg/m^3$, la gravedad específica de un aceite mineral es típicamente de 0,85.

2.2. Análisis de laboratorio

Representan una poderosa herramienta de ayuda al mantenimiento de las máquinas, siempre y cuando se les sepa interpretar adecuadamente. Los principales análisis realizados a los lubricantes son:

1. Gravedad Específica (gr/cm^3): Método ASTM D287.
   Su valor en servicio no es fundamental para determinar el estado del aceite, pero sirve para comprobar otras características como la viscosidad, el contenido de insolubles en pentano y el número de neutralización TAN.

2. Viscosidad $cSt/40CycSt/100C$: Método ASTM D88/D445. Es la propiedad más importante de un lubricante. Corresponde a la resistencia interna que existe entre dos capas de fluido cuando tienden a moverse una respecto a la otra. Indica la resistencia a fluir.
   Permite evaluar el espesor de la película lubricante

3. Indice de viscosidad, (adimensional). Método ASTM D567. Número que indica el efecto relativo entre lubricantes, respecto a la variación de viscosidad en función de la temperatura.

4. Punto de inflamación (C). Método ASTM D92. Representa la menor temperatura en la cual los vapores sobre la fase líquida pueden encenderse si se aplica una llama. Mide la tendencia de una sustancia a formar una mezcla inflamable con el aire.

5. Punto de fluidez. Corresponde a la menor temperatura a la cual un aceite fluirá. La mayoría de los aceites minerales contienen ceras disueltas. Cuando se enfría el aceite, la cera empieza a separarse como cristales que atrapan el líquido remanente. Indica la capacidad de un aceite para fluir y por lo tanto para mantener su capacidad lubricante a bajas temperaturas.

6. Residuos de carbón Conradson (% *en peso*). Método ASTM D189/D524

7. Número de ácido total (TAN), ($mgrKOH/gr.ac.us$). Método ASTM D664.
   Indica el grado de oxidación del aceite usado. Sin embargo, no es definitivo en el cambio de aceite usado porque pueden haber ácidos presentes no corrosivos diluídos en el aceite que aun no atacan las superficies metálicas de los mecanismos lubricados.

   - Número de Neutralización:
     - Número de acidez total (TAN): para aceites industriales
     - Número de basicidad total (TBN): para aceites de motor
   - Indica la tendencia del agotamiento de ciertos aditivos como el ZDDP, detergentes básicos e inhibidores de oxidación
   - Identifica el inicio de la oxidación del aceite básico
   - Mide el nivel de ácidos corrosivos
   - Mide el nivel de reserva alcalina (TBN)
   - El TAN pierde precisión en el rango de 0,1 a 0,5, donde muchos aceites más lo necesitan
   - Para los aceites minerales, TAN > 4 debe ser considerado altamente corrosivo
   - En aceites a altas temperaturas, los ácidos de la oxidación pueden evaporarse o polimerizarse, dando como resultado la pérdida de los síntomas de oxidación. Es mejor monitorear la oxidación por FTIR.
   - El agua es frecuentemente la causa de la formación de ácidos. Cuando el agua se mezcla con aceite, le proporciona a los ácidos el máximo potencial corrosivo
   - El TAN mide la concentración de ácido, no la potencia del mismo
   - Los aditivos EP y de aceites de motor pueden interferir con el TAN

8. Número básico total (TBN), ($mgrKOH/gr.ac.us$). Método ASTM D664. Permite al aceite neutralizar los productos ácidos que se forman durante la combustión.

9. Insolubles en pentano, ($\%enpeso$). Método ASTM D839

10. Productos de oxidación o resinas, ($\%enpeso$)
11. Tensión interfacial, ($Dinascm$). Método ASTM D971.
    Evalúa la capacidad de separar el agua del aceite por centrifugación.
12. Factor de potencia, (Hz/C). Método ASTM D924
13. Dilución de combustible, ($\%volumen$). Método ASTM D322
14. Demulsividad, ($emulsion/tiempo$). Método ASTM D1401.
    Permite verificar el contenido de aditivos anti-emulsionantes que aun le quedan al aceite industrial usado.
15. Estabilidad a la espuma, (ml) ó (cc/min). Método ASTM D892
16. Agua y sedimentos, ($\%$ $en\ volumen$). Método ASTM D95/96.
    El agua tiene un efecto devastador sobre el aceite y las piezas lubricadas porque genera oxidación y corrosión respectivamente. En los aceites con aditivos anti-desgaste en base a Ditiofosfato de Zinc (ZDDP) reacciona con ellos y da lugar a la formación de ácido sulfúrico eliminando la película límite.
17. Corrosión. Método ASTM D130.
    Se puede elevar por contaminación de H_2S, pero se puede restituir a su valor original con proceso de diálisis.
18. Herrumbre, ($\%$). Método ASTM D665
19. Contenido de ceniza, ($\%\quad en\quad peso$). Método ASTM D482/874
20. Punto de anilina, ($C - F$). Método ASTM D611.
    Permite determinar la composición de la base lubricante parafínica, nafténica o aromática
21. Estabilidad a la oxidación, (hr/TAN). Método ASTM D943
22. Rigidez dieléctrica, (Kv). Método ASTM D877/D1816

- FTIR: Monitoreo molecular. Espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier
  - El FTIR proporciona un medio rápido de monitoreo de múltiples parámetros del aceite, la salud del aceite básico, la condición de los aditivos y los contaminantes

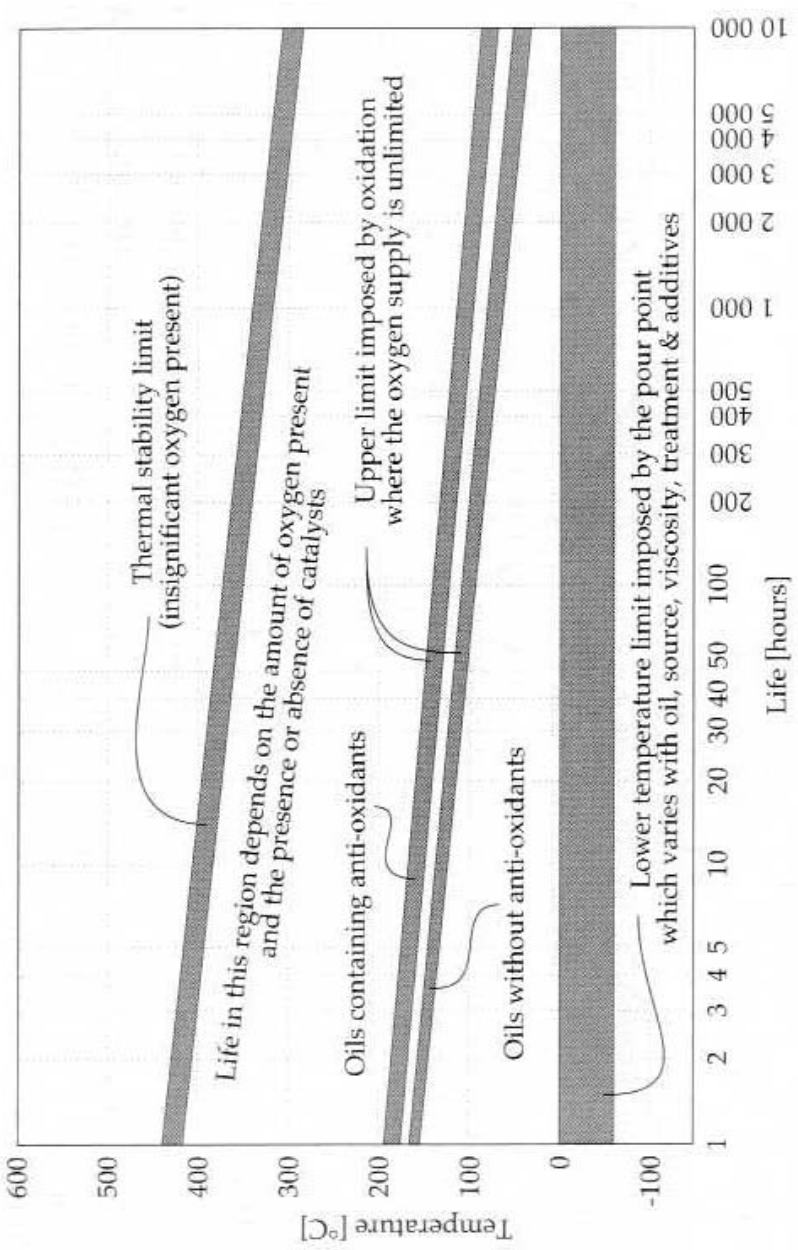


Figura 2.20: Temperatura límite para aceites minerales

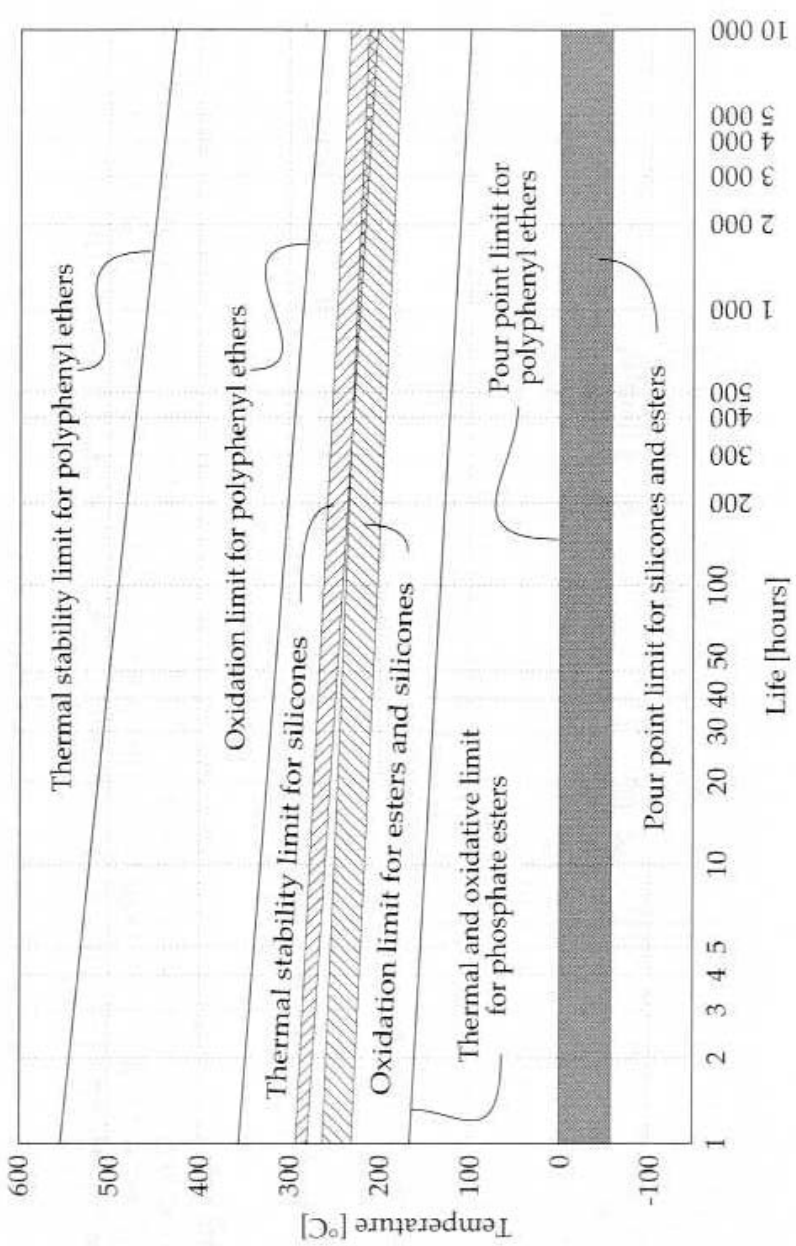


Figura 2.21: Temperatura límite para aceites de origen sintético

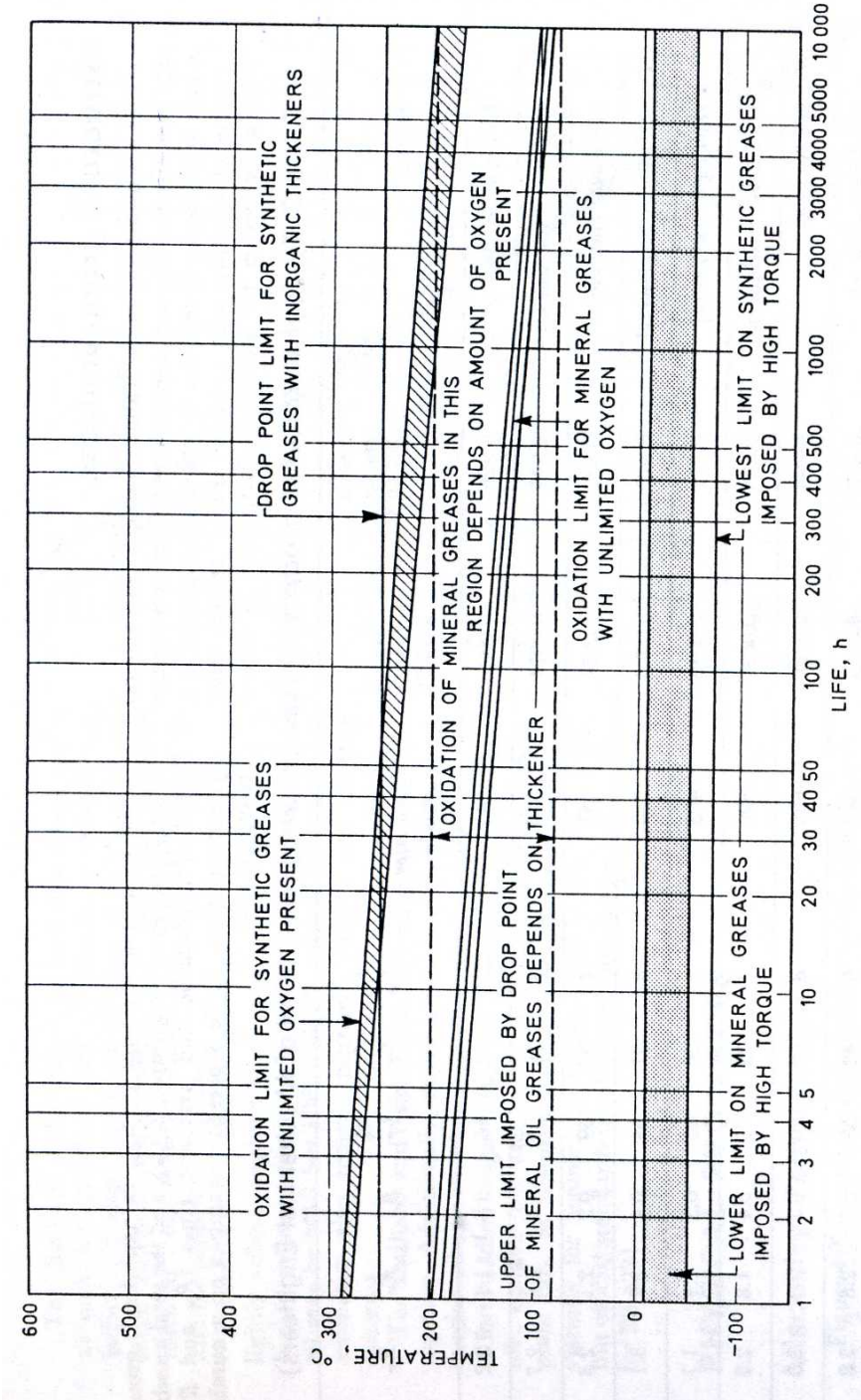


Figura 2.22: Temperatura límite para grasas

Tipo de grasa	Tipo de jabón	Color	Textura	Penetración (mm/10) 25°C	Punto de goteo °C	Viscosidad aceite base cSt/40°C	Oxidación en la bomba rotativa, caída de presión 500 hr, KPa	Fuga (gr)	% Evaporación (22 hr)
				Método ASTM D-217	D-566				
Rodamientos de bolas y rodillos									
Temperatura baja	Li	–	blanda	300	190	12-16	35-60	0,0	0,8/120°C
Temperatura media	Na, Ca	–	mantecosa	280	200	64-70	42-86	< 1,0	0,8/125°C
Temperatura alta	Na	–	mantecosa	260-300	195	107-150	28	–	0,6/150°C
Velocidad alta	Li, Na	canela	mantecosa	280	260	100-130	14-90	–	0,5/100°C
Carga alta	Na	café	fibrosa	300	190	20/100°C	–	–	1,3/100°C
Extrema presión	Ca, Li	canela	blanda mantecosa	280-300	230-260	108	56-120	0-0	–
Máquinas de alimentos	Ca	canela	–	300	265	71	400 (100 hr)	–	–
Resistente al agua	Ca	café	–	300	85-95	190	–	–	–
Cojinetes abiertos	Na, Ca	canela	sólida	60	200	21	–	–	–
Cojinetes de ferrocarril	Li, Ca	ámbar	fibrosa	300	170	160	50	–	–
Multipropósito	Li	ámbar	blanda	270	300	100	40-100	0,4	–
Industria del acero	Ca, Li complejo de Al	ámbar	blanda	310	180	–	150	2,3	–
Industria textil	Ca	café claro	–	320	200	–	42	0,0	–
Amplio rango de temperaturas	sin jabón	café	blanda	300	260	–	–	0,0	7,0/177°C
Automotriz	Ca, Na complejo Li	verde	blanda mantecosa	260-300	250	150	60-70	0-1,5	–

Figura 2.23: Características físico-químicas de algunas grasas lubricantes

Tipo de compuesto		Viscosidad a 100°C (cSt)	Densidad Relativa	Índice de Viscosidad	Punto de Inflamación (°C)	Punto de congelación (°C)
Aceite sintético	Polialfaolefina	18,12	0,870	126	221	- 79
	Diéster	19,6	0,955	176	232	- 51
	Poliol éster	15,0	0,975	135	232	- 51
	Poliglicol	50	1,01	150	177	- 55
	Éster fosfórico	6,7	1,02	90	220	- 80
Aceite Mineral	Fabricante 1	7,8	0,842	98	156	- 15
	Fabricante 2	19	0,860	103	200	- 15
	Fabricante 3	30	0,870	105	208	- 9

Figura 2.24: Principales características de los lubricantes sintéticos y minerales. Valores característicos comparativos

- La información más axacta y confiable proviene de espectrómetros infrarrojos de celdas de transmisión, no de espectrómetros de celdas de Reflectancia Total Atenuada (ATR)
- Las computadoras hacen la mayor parte del trabajo, pero entender el principio de funcionamiento es importante

MEXLUB®

LA LÍNEA MÁS COMPLETA DE LUBRICANTES

Ficha Técnica

Mexlub ® Aceite Multigrado API CH-4

Aceite Lubricante para Motores a Diesel

Descripción.

Mexlub ® Aceite Multigrado API CH-4 son aceites de tipo multigrado elaborados a base de aceite básicos vírgenes, aditivos de la más avanzada tecnología y un aditivo mejorador del índice de viscosidad de alta resistencia al corte para proporcionar un aceite lubricante de excepcionales características que puede ser utilizado en la lubricación de vehículos de servicio pesado con motores a diesel que soportan altas cargas y altas velocidades.

Aplicación.

- Recomendados para usarse con motores a diesel de 4 tiempos de alta velocidad que deben de cumplir con los estándares de emisiones de 1998 de la EPA. Esta calidad es superior a los aceites con calidad CD, CE, CF-4 y CG-4.
- El aceite 20W-50 se recomienda para motores con alto kilometraje gracias a su mayor viscosidad.

Propiedades y Beneficios.

- Excelente resistencia a la degradación térmica y a la oxidación.
- Periodos de drenado extendidos.
- Excelente bombeabilidad en climas fríos.
- Alto nivel de detergencia y dispersancia para mantener más limpio el motor.
- Alto control de emisiones.

Especificaciones y/o Aprobaciones

- API CH-4, CG-4, CF-4 / SJ
- ACEA E2/B3/A2
- Cummins 20076/20072/20071
- Mack EO-M Plus
- Mercedes Benz 228.1 y 229.1
- Volvo VDS-2 y VDS
- Man 271
- CAT ECF-1-a
- Renault Truck RD/RD-2
- MTU Type 1

Características Típicas.

CARACTERISTICAS	Método ASTM	Valores Tipicos	
Grado SAE		15W-40	20W-50
Apariencia	Visula	Clara y Brillante	Clara y Brillante
Viscosidad @ 100 °C, cSt.	D445	15.0	19.0
Viscosidad @ 40°C, cSt	D445	109.0	160
Viscosidad CCS, cPa -20 °C	D5293	6,500	9,000
Índice de Viscosidad	D2270	130	125
TBN, mg KOH/g	D2896	9.5	9.5
Cenizas Sulfatadas, % en peso	D874	0.98	0.98
Punto de Inflamación, °C	D92	220	236
Punto Mínimo de Fluidez, °C	D97	-24	-18
Gravedad Específica @ 15.0 °C	D4052	0.8830	0.8950

Salud y Seguridad.

Mexlub ® Aceite Multigrado API CH-4 no produce efectos nocivos cuando se utiliza en las aplicaciones recomendadas, y se respetan unas adecuadas prácticas de seguridad e higiene en el trabajo.
No contamine, no tire el aceite usado al alcantarillado, para mayores detalles consulte la Hoja de Seguridad del Producto.

Nota. Las propiedades típicas del producto son actuales al fecha de publicación de esta ficha técnica.
Estas propiedades son determinadas promediando los datos reales del lote suministrado por las plantas de fabricación sobre un periodo de tiempo.
Estos datos típicos no pueden ser garantizados idénticos a los productos en cualquier momento específico.
Los datos suministrados en esta publicación son presentados como guía para los usuarios de productos Bardahl. Consulte a su representante para la información más reciente.

Figura 2.25: Ejemplo de propaganda de un aceite comercial mexicano

Cuadro 2.2: Propiedades fisico-químicas de aceites sintéticos y minerales

Propiedad	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Características viscosidad - temperatura	M	B	M	E	MB	B	P	E	E	M	P
Desempeño a bajas temperaturas	P	B	B	B	B	B	M	B	B	B	P
Estabilidad a la oxidación (con inhibidor)	M	MB	M	MB	M	P	B	MB	MB	E	MB
compatibilidad con aceites minerales	-	E	E	B	M	P	M	P	M	P	B
Volatilidad	M	B	B	E	E	B	B	B	B	M	B
Compatibilidad con pinturas y barnices	E	E	E	B	M	M	P	B	M	B	M
Estabilidad a la hidrólisis	E	E	E	M	M	B	M	B	P	MB	E
Características antiherrumbre (con inhibidor)	E	E	E	M	M	B	M	B	-	-	-
Solubilidad con aditivos	E	B	E	MB	MB	M	B	P	-	-	-

Observación 1:
P: Pobre; L: Ligera; M: Moderada; B: Buena; MB: Muy Buena;
E: Excelente; N: Ninguna; F: Fuerte
Observación 2:
(1): Aceite mineral común; (2): Polialfaolefina; (3) Aromáticos alquilados;
(4): Esteres de ácidos dibásicos; (5): Poliésteres; (6): Polialkileneglicol;
(7): Esteres de ácido fosfórico; (8): Siliconas; (9): Esteres de silicato;
(10): Fluorocarbonos; (11): Esteres de polifenil

Cuadro 2.3: Detección de ácidos corrosivos usando el TAN

Tipo de ácido	Ensayo para confirmación	Fuente	Aplicación del lubricante
Orgánico	FTIR Oxidación	Productos de la oxidación del aceite	Ambientes severos
Clorhidrico	Adelgazamiento de la viscosidad	Degradación de refrigerante Freón	Compresores frigoríficos
Fluorhídrico	adelgazamiento de la viscosidad	Degradación de refrigerante Freón	Compresores frigoríficos
Sulfúrico	FTIR sulfatación	Contaminación con gas oil agua y H_2S	Motores diesel Compresores de gas natural
		Ruptura de aditivos	Sistemas hidraulicos
Nítrico	FTIR Nitración	AD y EP Nitración y óxidos nitrosos	Motores a gas Motores a gasolina
Fosfórico	Análisis de elementos (fósforo)	Ambiente de amina con fosfatos	Equipos móviles, circuitos hidraulicos especiales

Cuadro 2.4: Análisis de aceite de primera generación

Propiedad	NORMA ASTM	Importancia	Cómo se determina
Viscosidad	D-445	Define el grado de viscosidad del aceite básico	Viscosímetro de flujo capilar por gravedad
Indice de viscosidad	D-2270	Define la relación entre la temperatura y la viscosidad	Variación de la viscosidad entre 40°C y 100°C, indexada
Densidad	D-1298	Define la densidad de un aceite con respecto al agua	Hidrómetro
Punto de inflamación	D-92/D-93	Define las propied. de inflamación y volatilidada altas temperaturas	Temperatura a la que se inflama la superficie
Punto de Congelación	D-97/IP15	Define el comportamiento de un aceite a bajas temperaturas	Flujo por gravedad en un recipiente de prueba. Temperatura a la que se alcanza una viscosidad de 22000 cSt

Table 12-1
Relative Cost of Vegetable and Synthetic Oils

Lubricant	Relative Cost to Mineral Oil[1]
Vegetable Oils[1]	2 - 3
Synthetic Fluids[2]	
Polybutenes	2
Polyalphaolefins	3
Dialkylbenzene	5
Polyalkyline glycols	3 - 5
Polyol esters	3 - 5
Diesters	2 - 6
Phosphate esters	4 - 7
Cycloaliphatics	9 - 15
Silicone fluids	12 - 24
Silicate esters	33 - 45
Halogenated hydrocarbons	100 - 450
Polyphenyl ethers	625 - 700

[1] Rhee, 1996 (Vegetable oils).
[2] Straiton, 1998 (Synthetic fluids).

Table 12-2
Relative Cost of Greases

Grease Type	Base Oil	Relative Cost to Lithium Grease[1]
Aluminum	Mineral	2.5 - 3
Calcium	Mineral	0.8
Lithium	Mineral	1
Sodium	Mineral	0.9
Aluminum complex	Mineral	2.5 - 4
Calcium complex	Mineral	0.9 - 1.2
Lithium complex	Mineral	2
Sodium complex	Mineral	3.5
Lithium	Ester	5 - 6
Lithium complex	Ester	10
Lithium complex	Silicone	20
Bentonites (organo clay)	Mineral	2 - 6
Polyurea	Mineral	3
Polyurea	Silicone	35 - 40
Polyurea	Fluorosilicone	100

[1] Mancuso and South 1994.

Figura 2.26: Costos relativos [1]

Cuadro 2.5: Efectos por selección de viscosidad inadecuada

		Efectos
Viscosidad	Muy Alta	Generación de calor, oxidación barnices, lodos Cavitación Flujo inadecuado en rodamientos, etc. Batido de lubricante en cojinetes Pérdidas por consumo de energía debilitamiento características antiespumantes y demulsificantes
	Muy baja	pérdida de película d aceite lubricación límite desgaste excesivo alta fricción mecánica, pérdidas de energía generación de calor oxidación, etc fugas internas y externas incremento sensibilidad en sistema de contaminación por partículas rotura película a altas temperaturas, baja velocidad y/o alta carga

Capítulo 3

Aceites y grasas lubricantes

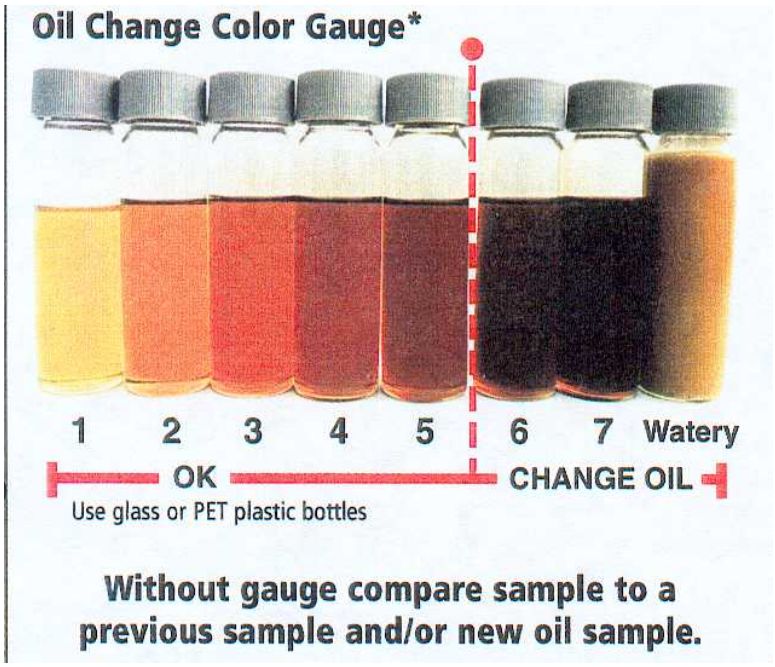


Figura 3.1: Degradación de colores debido al tiempo de uso en aceites industriales

3.1. Aceites lubricantes

Es toda sustancia líquida de origen animal, vegetal, mineral o sintética que permite separar dos superficies en movimiento relativo, reduciendo el desgaste, refrigerándolas, evacuando contaminantes y protegiéndolas del medio circundante. Los aceites se pueden clasificar en orgánicos y en minerales.

3.1.1. Aceites orgánicos

Son de tipo animal y vegetal. Cuando aún no se conocía el petróleo, eran los únicos utilizados. Se descomponen con facilidad con el calor y a bajas temperaturas se oxidan formando gomas como el aceite de semilla de lino, cuya oxidación es tan rápida que es inútil utilizarlo en lubricación. La mayoría de estos aceites se emplean como aditivos de aceites minerales, para darles propiedades de untuosidad, como es el caso de los ácidos grasos, especialmente el esteárico y el palmítico.

El aceite de ricino posee moléculas largas de carácter ácido en un extremo y oleoso en el otro; el extremo ácido se adhiere a la superficie metálica formando un filamento ácido hidrocarbonado, el cual, en caso de que la película fluida desaparezca, protege las superficies del contacto metálico, al deslizar unas sobre otras.

El extremo oleoso presenta igualmente esta característica, lo cual permite formular los llamados aceites counpound (compuestos), que presentan buenas propiedades de extrema presión (EP) a temperatura por debajo de 50°C y una lubricación adicional o de emergencia en caso de un suministro inadecuado de lubricante.

3.1.2. Aceites minerales

Son derivados del petróleo, constituidos por una estructura de moléculas complejas que contienen entre 20 y 70 átomos de carbono por molécula. Un aceite lubricante está constituido por una base lubricante y un paquete de aditivos químicos que le confieren nuevas propiedades o le mejora otras que ya tenga. Con relativa frecuencia, los fabricantes de equipos utilizan el término aceite mineral como un lubricante sin aditivos.

3.1.3. Fabricación de aceites lubricantes

- Mezcla de bases lubricantes del mismo tipo (dos máximo) para obtener las viscosidades y calidades requeridas.
- Aditivos según las necesidades de aplicación y de servicio.

3.1.4. Bases lubricantes

Son las que determinan la mayor parte de las características del aceite, tales como: viscosidad, índice de viscosidad, resistencia a la oxidación, punto de inflamación y de fluidez, etc. De acuerdo con el tipo de crudo, la base lubricante puede ser: parafínica, nafténica o aromática.

3.1.5. Base parafínica

Contienen porcentajes de hidrocarburos parafínicos del 75 % o mayores. Se caracterizan por la cadena C_nH_{2n+2}. Son relativamente estables a altas temperaturas, pero por el alto contenido de parafina que poseen no funcionan satisfactoriamente a bajas temperaturas.

Cuando la disposición es lineal se habla de parafinas de cadena recta, que poseen excelentes propiedades de combustión y un elevado índice de cetano, por lo que se les prefiere en la elaboración de gas oil, keroseno y fuel oil.

Cuando existen ramificaciones, se habla de isoparafinas, las cuales poseen índices elevados de octano y son preferidas en las gasolinas, particularmente en las de aviación. Sus características más importantes son:

- Alto índice de viscosidad (VI). Las hace particularmente indicadas en situaciones donde hay cambios de temperatura, debido a que varia muy poco su viscosidad.
- Baja razón de oxidación. Cuando se encuentra sometida a altas temperaturas, permanece sin deteriorarse apreciablemente durante largos periodos de tiempo,
- Baja volatilidad.
- Bajo poder disolvente.
- Forma carbones duros cuando se descompone.

- Alto punto de congelación debido al elevado porcentaje de parafina que posee.

Este tipo de bases son las más empleadas en la fabricación de aceites lubricantes, tanto de tipo industrial como automotor, por las excelentes propiedades que poseen. Sin embargo, son muy escasas y cada vez es más difícil de obtener.

3.1.6. Bases nafténicas

Contienen porcentajes de hidrocarburos nafténicos del 70 % o mayores. Se caracterizan por la fórmula C_nH_{2n} y frecuentemente poseen una elevada proporción de asfalto. A alta temperatura son menos estables que las parafinas, contiene una mínima cantidad de parafinas, por lo tanto, no forman ceras a bajas temperaturas y permanecen en estado líquido. Las moléculas forman ciclos de cinco y de seis átomos. Sus características más importantes son:

- Bajo índice de viscosidad.
- Alto poder disolvente natural. Contiene un elevado porcentaje de compuestos aromáticos, lo cual permite que puedan disolver ciertos tipos de cauchos.
- Reducida tendencia a la formación de carbón. Cuando se queman, el carbón residual es blando y escaso.
- Bajo punto de fluidez. Como prácticamente carecen de ceras, las hace particularmente indicadas para condiciones de bajas temperaturas.
- Alta volatilidad.

Las bases nafténicas con un VI mediano $(40-75)$, se emplean en la fabricación de aceites minerales blancos (USP) y de transformadores, luego de un tratamiento final con ácido, hidrógeno y arcilla. Debido a su mayor poder de solvatación, son más compatibles con ciertos aditivos como los emulsificantes, lo cual los hace ideales en la formulación de los aceites para maquinado de metales.

La solvatación es el proceso de asociación de moléculas de un disolvente con moléculas o iones de un soluto. Al disolverse los iones en un solvente, se dispersan y son rodeados por moléculas del solvente. A mayor tamaño

del ion, más moléculas de solvente son capaces de rodearlo, y más solvatado se encuentra el ion. La razón de ello es que la fuerza electrostática entre el núcleo del ion y la molécula del solvente disminuye de forma marcada con la distancia entre la molécula de solvente y el núcleo del ion. Así, el ion más grande se une fuertemente con el solvente y por ello se rodea de un gran número de moléculas de solvente.

Los crudos netamente parafínicos son escasos, por lo tanto los aceites de base parafínicas se obtienen a partir de crudos de base mixta (parafínica y nafténica), pero en donde predomina el componente parafínico sobre el nafténico, en proporción superior de 2 a 1. Los crudos de base nafténica son más abundantes, por lo cual su uso tiende a intensificarse. Las bases parafínicas y nafténicas a su vez se clasifican internamente de acuerdo a su IV, el cual las hace aptas para un determinado tipo de servicio

Cuadro 3.1: Clasificación del índice de viscosidad de las bases parafínicas y nafténicas

TIPO DE BASE	RANGO IV	CLASIFICACION
Parafínicas	110 - 120	Muy alto
	84 - 105	Alto
	60 - 80	Mediano
Nafténico	40 - 75	Mediano
	0 - 20	Bajo
	< 0	Muy bajo

3.1.7. Bases aromáticas

Estas bases no se utilizan en la fabricación de aceites lubricantes, debido a que no presentan prácticamente ninguna característica que amerite su implementación. Su viscosidad disminuye rápidamente con la temperatura y presentan tendencia a la formación de gomas a altas temperaturas. Su estructura molecular está constituida por ciclos de doble ligadura, parecidas a las del benceno. Sus características más importantes son:

- Indice de viscosidad muy bajo.
- Alta volatilidad.
- Se oxidan fácilmente.
- Tendencia a formar gomas y resinas.

- Se emulsionan fácilmente con agua.

3.2. Aditivos

Main Type	Function and Subtypes
Acid neutralizers	Neutralize contaminating strong acids formed, e.g., by combustion of high sulfur fuels or by decomposition of active EP additives.
Antifoam	Reduce surface foam.
Antioxidants	Reduce oxidation. Various types are: oxidation inhibitors, retarders; anticatalyst metal deactivators, metal passivators.
Antirust	Reduce rusting of ferrous surfaces swept by oil.
Antiwear agents	Reduce wear and prevent scuffing of rubbing surfaces under steady load operating conditions
Corrosion inhibitors	Type (a) reduces corrosion of lead; type (b) reduces corrosion of cuprous metals.
Detergents	Reduce or prevent deposits formed at high temperatures, e.g., in internal combustion engines.
Dispersant	Prevent deposition of sludge by dispersing a finely divided suspension of the insoluble material formed at low temperature.
Emulsifiers	Form emulsions; either water-in-oil or oil-in-water, according to type.
Extreme pressure	Prevent scuffing of rubbing surfaces under severe operating conditions, e.g., heavy shock load, by formation of a mainly inorganic surface film.
Oiliness enhancers	Reduce friction under boundary lubrication conditions; increase load-carrying capacity where limited by temperature rise by formation of mainly organic surface films.
Pour- point depressants	Reduce pour point of paraffinic oils.
Tackiness agents	Reduce loss of oil by gravity, e.g., from vertical sliding surfaces, or by centrifugal force.
Viscosity index improvers	Reduce the decrease in viscosity due to increase of temperature

Figura 3.2: Tipos básicos de aditivos usados en la práctica

Prácticamente todos los tipos de aceites lubricantes contienen uno o más aditivos. La cantidad utilizada varía desde un 0.01 % hasta 30 % o más. Los aditivos son sustancias químicas que se añaden a las bases lubricantes con el fin de mejorarle determinadas propiedades que tenga y así obtener aceites lubricantes con características específicas.

Algunas veces se utilizan las bases como aceites minerales; en estos casos no se necesita que el aceite posea aditivos, porque las condiciones de trabajo no lo exigen y el único factor a considerar es la viscosidad. La Tabla presentada en la figura 3.2 muestra los principales aditivos usados en la práctica en equipos industriales.

Cuadro 3.2: Aditivos comunes en lubricantes

Máquina	Aditivos comunes UTILIZADOS	% Volumen ACEITE
Motores	Antioxidante, inhibidor de corrosión Detergente/dispersante, antidesgaste antiespuma, mejorador de alcalinidad	10-30
Turbinas de vapor compresores	Antioxidante, inhibidor de corrosión demulsificante	0.5 - 5
Engranajes en espiral cónicos o hipoidales	Antidesgaste, antioxidante antiespumante, a veces inhibidor de corrosión, extrema presión	1 - 10
Engranajes sinfin	Extrema presión, antioxidante, inhibidor de corrosión, ácidos grasos	3 - 10
Sistemas Hidraulicos	Antioxidante, antidesgaste, antiespumante, inhibidor corrosión depresor del punto de congelación mejorador del indice de viscosidad	2 - 10

3.2.1. Características de los aditivos

Los más importantes son:

- Disminuir la velocidad a la cual ocurren ciertas reacciones, como por ejemplo la oxidación que resulta indeseable en el aceite durante su periodo de servicio.
- Proteger la superficie lubricada de la agresión de ciertos contaminantes.
- Mejorar las propiedades físico-química del lubricante o proporcionarle otras nuevas.

3.2.2. Propiedades de los aditivos

Las propiedades más importantes son:

- Color: no es de gran importancia, aunque muchas veces se cae en el error de considerarlo un factor determinante de la calidad de un aceite.

- Olor: Son inodoro y un olor indeseable sólo se deberá presentar como resultado del proceso de oxidación y descomposición normal del aceite.
- Compatibilidad: deben ser compatibles cuando sean necesarios dos o más en la misma base lubricante. La compatibilidad debe perdurar hasta que el aceite llegue al final de su vida útil.
- Solubilidad en la base lubricante: deben ser solubles con ésta en cualquier rango de temperatura de funcionamiento. Igualmente no se deben volver solubles o parcialmente solubles durante el almacenamiento del aceite.
- Insolubilidad con el agua: con el fin de que no sean lavados cuando se encuentren en presencia de ésta.
- Volatilidad: debe ser baja para que concentración y efectividad no disminuya cuando el aceite se encuentre sometido a elevadas temperaturas de trabajo.
- Estabilidad: debe permanecer estable durante la mezcla, almacenamiento y uso.
- Flexibilidad: sus propiedades físicas y químicas deben ser tales que permitan ampliar su rango de servicio a aplicaciones.

3.2.3. Clasificación de los aditivos

Aditivos modificadores de propiedades físicas

- Mejoradores del índice de viscosidad (VI). Una función obvia de estos aditivos es mejorar la relación viscosidad-temperatura del aceite. Este efecto se puede obtener también mediante la super-refinación del aceite del aceite mineral o a través de la síntesis de estructuras orgánicas específicas (aceites sintéticos). Sin embargo, los aceites espesados con polímeros son más baratos que los productos obtenidos por estos métodos alternos.

  Se utilizan polímeros de alto peso molecular de cadena larga, los cuales, cuando el aceite está frío se enrollan y su efecto sobre la viscosidad es mínimo. Pero cuando el aceite está caliente, tienden a desarrollarse y la reacción entre estas largas moléculas y el aceite produce un efecto de espesamiento proporcionar al incremento de la temperatura. Su voluminosidad determina el grado hasta el cual el polímero incrementa

la viscosidad del aceite y depende de dos factores: peso molecular y solubilidad.

Es de notar que aunque la mezcla aceite-polímero disminuye su viscosidad con los aumentos de la temperatura, esta disminución no es tan grande como sería la del aceite sin el polímero. La finalidad de los mejoradores de VI es la de obtener un producto lo más cercano posible al lubricante ideal, esto es, uno cuya viscosidad permanezca inalterable con los cambios de temperatura.

Los más utilizados son los polisobutilenos, los copolímeros de alquil metacrilato, los copolímeros de olefinas (OCP), los polimetacrilatos (PMA) y los copolímeros de isopreno y estireno (SIC).

- Depresores del punto de fluidez. Se emplean en los aceites parafínicos, con el fin que puedan ser utilizados a temperaturas mucho más bajas que si se estuviera empleando la base lubricante sola. Reducen la acción de formación de cristales de parafina, los cuales dan lugar a redes internas que absorben aceite, originando masas gelatinosas de gran volumen, las cuales restringen el flujo o escurrimiento del aceite.

  Los aceites de base parafínica requieren que se les agregue depresores del punto de fluidez, mientras que los de base nafténicano los necesitan porque están prácticamente libres de cristales de parafina. Los tipos de depresores más utilizados son los polímeros y los copolímeros de alquil metacrilato y alfa-olefinas, poliacrilamida, copolímeros de vinil carboxilato - dialquil fumadores y los poliestirenos alquilatados.

Aditivos modificadores de propiedades químicas

- Inhibidores de la oxidación. La oxidación es una reacción química que ocurre en el aceite y que puede ser más o menos severa, dependiendo de factores tales como el oxígeno del aire, temperaturas de operación, humedad y catalizadores como el cobre.

  La oxidación del aceite se debe controlar porque da lugar a que el aceite se enturbie, aumente su viscosidad y forme gomas, lodos y barnices que pueden obstruir los conductos de lubricación, dando lugar a fallas y reparaciones costosas. Adicionalmente, el aceite no podrá recircular

a la razón apropiada, disminuyendo así su capacidad como medio enfriante.

Esta es una razón más para sustituir el aceite cuando su nivel de deterioro empieza a ser alto. Se pueden considerar los 50°C como la temperatura máxima normal de funcionamiento y por encima de ésta, por cada 10°C de incremento se duplica la razón de oxidación, con lo cual se debe reducir a la mitad la frecuencia de cambio del aceite para el mismo incremento de temperatura.

Temperaturas del orden de 80°C no se deben tolerar en equipos industriales a menos que no haya otra alternativa y en caso tal, su lubricación debe ser con aceites sintéticos. Por lo general, se debe tomar como regla práctica, emplear este tipo de lubricantes para temperaturas de operación por encima de 60°C.

A altas temperaturas es necesario que el aceite posea aditivos o inhibidores que retarden su oxidación. Las sustancias que se emplean tienen más afinidad por el oxígeno que por las parafinas y por lo tanto, lo retienen, demorando así la oxidación. La mayoría de los aceites cuentan con este aditivo, el cual se conoce comercialmente como R y O (Rust and Oxidation).

Estos aditivos actúan como peróxidos o agentes de terminación de la cadena al reaccionar con los radicales libres, para formar compuestos estables o pueden actuar como pasivadores metálicos para impedir los efectos catalíticos.

Las sustancias más utilizadas como inhibidores de la oxidación son el ditiofosfato y el dialquilditiofosfato de zinc, compuestos orgánicos de azufre, fósforo y nitrógeno, como las aminas, los sulfitos, los hidroxisulfitos y los fenoles. Para altas temperaturas, los inhibidores más utilizados son los ditiosfosfato de zinc y para temperaturas normales los fenoles bloqueados.

- Inhibidores de la corrosión. El término inhibidor de la corrosión se aplica a los productos que protegen los metales no ferrosos, susceptibles a la corrosión, causada por los contaminantes ácidos presentes en el

lubricante. Probablemente los dos tipos de corrosión más importantes son:

- Por ácidos orgánicos generados por el mismo aceite.

- Por contaminantes presentes en el aceite.

Como inhibidores de corrosión se utilizan los ditiofosfatos de zinc, los ditiocarbonatos metálicos y el éster del ácido estilfosfórico. Estos materiales reaccionan químicamente con la superficie metálica, formando una película protectora.

- Inhibidores de la herrumbre. Se emplean para proteger las superficies ferrosas (hierro y acero) contra la formación de óxidos, cuando están expuestos al aire húmedo o al contacto con el agua. Prácticamente todos los mecanismos que trabajan recubiertos, como es el caso de engranajes de un reductor de velocidad, están expuestos a este contaminante, ya sea que provenga de una fuente exterior o de la condensación del agua presente en el aire atmosférico, principalmente cuando el equipo trabaja sometido a ciclos de paradas y arrancadas frecuentemente. Como inhibidores de herrumbre se emplean compuestos sulfonitos, aminas, ácidos grasos, fosfatos y ésteres.

- Antiemulsionantes.
  Se utilizan para separar el agua del aceite cuando este contaminante está presente. Normalmente la presencia de agua puede ser consecuencia de la condensación de la humedad en el sistema, debido a los cambios de temperatura (entre el día y la noche) o como resultado de paradas y arrancadas frecuentes del equipo. En otros equipos, como en las turbinas de vapor, el agua puede tener su origen en el vapor condensado que pasa a través de los sellos (de laberinto o de carbón) hasta las chumaceras en donde contamina el aceite.

  El agua mezclada con aceite forma emulsiones indeseables porque ambos retienen suciedades, dan lugar a corrosión química, disminuyendo la capacidad lubricante del aceite y producen sedimentos altamente peligrosos, que pueden ser solubles en el aceite. Los solubles permanecen disueltos en el aceite hasta que encuentran temperaturas bajas, como en los enfriadores de aceite, en donde se precipitan en forma de lodo, formando películas aislantes que impiden que el aceite se enfríe adecuadamente, dando lugar a la oxidación prematura del mismo.

Los insolubles se precipitan en todo el sistema, llegando en casos extremos a obstruir parcial o totalmente la tubería de circulación del aceite. Los lodos pueden ser húmedos con la apariencia de una grasas NLGI 3, o secos, en forma de diminutas partículas de arcilla.

3.2.4. Modificadores de propiedades fisico químicas

Mejoramiento del poder detergente-dispersante

La formación de depósitos (barnices y lodos) en un motor pueden reducirse mediante el uso de inhibidores de oxidación y aditivos detergentes. En aquellos casos en que la oxidación del aceite es la principal fuente de depósitos en motores diesel y servicio severo en motores a gasolina, el uso de antioxidantes reduce eficazmente la deposición. Los mayores causantes de formación de depósitos son hidrocarburos altamente reactivos, como las diolefinas.

La neutralización de componentes ácidos es una función muy importante de muchos detergentes metálicos. Dicha alcalinidad se expresa en términos de TBN (número básico total). Por lo tanto, cuando el TBN de un aceite disminuye, su detergencia también se reduce gradualmente. Sin ayuda de los aditivos detergentes, el aceite no podría depender o mantener en suspensión los depósitos que se produzcan. Los detergentes más usados hoy en día son:

- los jabones orgánicos y
- las sales de metales alcalinos, tales como el bario, el calcio y el magnesio.

La dispersancia es la capacidad del aceite de dispersar los lodos húmedos originados por el funcionamiento frío del motor a bajas temperaturas. Estos lodos están constituidos por una mezcla compleja de productos no quemados de la combustión, carbón, óxidos de plomo y agua.

Con mucha frecuencia se confunden los términos detergente y dispersante porque la limpieza del motor se relaciona más con la propiedad detergente que con la actividad dispersante. La detergencia de un aceite actúa sólo cuando las temperaturas de operación del motor son normales y la dispersancia sucede si dichas temperaturas son bajas.

Antiespumantes

Cuando un aceite es agitado, el aire puede incorporarse en él y formar pequeñas burbujas de distinto tamaño, que tienden a subir a la superficie, formando espuma más o menos persistente. Las burbujas de mayor tamaño se rompen con más facilidad que las pequeñas, jugando un papel muy importante la tensión superficial del aceite. La tendencia a la formación de espuma se incrementa con las temperaturas bajas, viscosidad alta, presencia de agua, velocidad de agitación elevadas y tensiones superficiales altas.

Los aditivos antiespumantes unen las burbujas de aire produciendo puntos débiles en ellas. Las burbujas entonces se revientan, formando burbujas más grandes, las cuales suben más rápidamente a la superficie, liberando de esta manera al aire. Los aditivos más utilizados son los polímeros de silicona y los copolímeros orgánicos que se adicionan al aceite en concentraciones entre 0.001 y 0.005 % por volumen. Para aceites cuyo uso está destinado a sistemas con alta humedad, se utilizan mezclas de un polímero especial de silicona y cera candelilla.

Antidesgaste

Se utilizan para reducir la fricción, el desgaste adhesivo y la picadura en condiciones de lubricación a película delgada y límite, las cuales ocurren cuando las películas fluidas no pueden ser formadas o mantenidas. Debido a que la película lubricante se vuelve cada vez más delgada por el incremento de la carga y la temperatura, ocurren los contactos metálicos a través de la película lubricante entre las irregularidades de las superficies.

A medida que estos contactos se incrementan aparecen los desprendimientos de metal, las picaduras y por último pueden ocurrir la soldadura o fundición de las partes. Los aditivos antidesgaste son sustancias polares tales como los ácidos grasos y los ésteres. Tienen largas cadenas, las cuales forman una película que se absorbe sobre las superficies metálicas con los extremos polares de las moléculas adheridas al metal y a las moléculas próximas a las superficies.

El contacto sucede entonces entre las capas que se han formado adheridas a las superficies. De esta manera, la fricción se reduce y las superficies se mueven más independientemente la una de la otra. El desgaste se reduce bajo condiciones de deslizamiento moderado, pero bajo condiciones de

deslizamiento severo de las capas pueden ser desprendidos y el efecto de reducción del desgaste se pierde.

De extrema presión (EP)

Se dividen en dos clases principalmente:

1. Por absorción física o química sobre la superficie.
2. Por reacción química sobre la superficie, para formar una película inorgánica sólida.

Los de absorción química reducen la fricción y frecuentemente se les conoce como agentes oleaginizantes o de tipo EP suaves. No proporcionan la elevada capacidad de soportar cargas pesadas sin que ocurra ruptura de la película lubricante. Los de reacción química se absorben sobre la superficie metálica formando una película sólida que impide el contacto metal-metal cuando la presión que actúa sobre ellas sea muy elevada y origine altas temperaturas que hacen que desaparezcan las condiciones hidrodinámicas y se presenten condiciones de película límite o EHL.

Debido a su polaridad, las moléculas se orientan asi mismas con la cabeza polar adherida a la superficie metálica. La película protectora que se forma es efectiva mientras se conserve sólida. Alcoholes, cetonas y amidas dejan de ser efectivos a temperaturas superiores a sus respectivos puntos de fusión. Esencialmente todos los aditivos EP contienen uno o más elementos, tales como el azufre, cloro, fósforo sales carboxílicas capaces de reaccionar químicamente con la superficie del metal, bajo condiciones de lubricación límite o EHL.

De untuosidad

Son compuestos de origen animal y vegetal que son solubles con el aceite y presentan una fuerte polaridad, permitiendo bajo condiciones límite, que sus moléculas queden adheridas a las superficies metálicas, mediante fuerzas de tipo electrostático e incluso químicas. Los aditivos untuosos y de EP cumplen el mismo fin, pero a diferentes temperaturas.

Los aditivos EP no desempeñan ninguna función a temperaturas por debajo de 50°C, porque no reaccionan con las superficies metálicas, mientras que los aditivos de untuosidad únicamente actúan hasta los 50°C, por encima de este valor la película untuosa se deshace y aumenta la fricción.

3.2.5. Aspectos a considerar en aceites con aditivos

- Un aceite específico con determinados aditivos no se debe mezclar con otro de diferente marca, aunque tenga las mismas especificaciones, porque en muchos casos se presentan incompatibilidades entre los diferentes aditivos.

  Esto se debe tener muy en cuenta cuando se trata de completar niveles de aceite en cajas de engranajes, reductores, compresores, etc. A nivel de motor de auto es aún más crítica esta circunstancia principalmente cuando el automovilista desprevenido llega a cualquier estación de servicio a que le completen el nivel de aceite del motor de su vehículo.

  El operario de la estación de servicio utiliza uno de la marca que él distribuye, la cual puede ser diferente al que el automovilista emplea.

- Nunca se le deben añadir aditivos a un aceite que está en servicio, con el fin de mejorarle alguna de sus propiedades. Esto es totalmente incorrecto porque no se pueden corregir anomalías en la formulación de un aceite después que este ya ha sido fabricado. Un aceite que no proteja adecuadamente un mecanismo es porque ha sido mal formulado o mal seleccionado. Los aditivos solamente se pueden mezclar con la base lubricante, de acuerdo con la formulación del aceite previamente establecida y sólo durante su proceso de fabricación.

- Los aditivos deben ser solubles en la base lubricante y el efecto que le confiere es, en la mayoría de los casos, específico, para el aceite que se desea obtener. O sea, un aditivo que es efectivo en una base lubricante puede no serlo, o al menos en el mismo grado en otra.

3.2.6. Lubricantes compuestos

Son la mezcla de un aceite mineral con cantidades reducidas de ácido graso. Una pequeña cantidad de éste es suficiente para recubrir completamente una superficie metálica, sin embargo, la cantidad a añadir tiene un punto óptimo porque a partir de un cierto porcentaje, el coeficiente de fricción disminuye en menor proporción.

El enlace entre el extremo activo de la molécula de ácido graso y la superficie metálica es muy fuerte, dando origen a una reacción que produce una película de jabón unida químicamente a la superficie metálica.

3.3. Factores que acortan la vida de un aceite

1. Altas temperaturas. Los derivados del petróleo por encima de los 50°C duplican su razón de oxidación, esto es, si se tienen dos reductores A y B que funcionan a 50 y 60°C respectivamente, el aceite en el reductor A tiene una vida útil de un año, mientras que el B solamente podrá durar 6 meses. Hasta donde sea posible se deben evitar las temperaturas altas de operación y esto se logra mediante la utilización de sistemas eficientes de enfriamiento.

   Además de la rápida oxidación del aceite (incremento acelerado del TAN), se forman lodos y gomas y en algunos casos extremos, si las temperaturas de operación alcanzan los 80 - 90°C, se presentan carbones duros y blandos provenientes de la descomposición de la base lubricante (generalmente parafínico). Un pequeño aumento de la temperatura de operación es otro aspecto muy importante que se debe tener en cuenta porque hace necesario el cambio del grado del aceite.

   Se puede tomar por norma que por aproximadamente cada 8°C de incremento en la temperatura, se debe aumentar en un grado ISO la viscosidad del aceite. Cuando se vaya a enfriar un aceite de tipo EP, se debe hacer hasta temperaturas por encima de los 50°C porque de otra manera se tendría que cambiar el tipo de aceite y utilizar uno de tipo Compound (compuesto).

2. Contaminación con agua. El agua en un aceite puede estar libre (emulsionada o en gotas) o disuelta (por debajo del punto de saturación). En un porcentaje por encima del valor máximo permisible, afecta considerablemente las características físico - químicas del aceite, dando lugar a la formación de herrumbre, corrosión y a la interrupción de la película lubricante, precipitación de aditivos y oxidación (incremento de la acidez y cambios en la viscosidad).

   Por las propiedades anti-emulsionantes del aceite, el agua se separa de este y se puede drenar por la parte inferior del equipo.

   Cuando el aspecto del aceite se vuelve lechoso, es porque se ha excedido el punto de saturación a la temperatura de trabajo, indicando tanto la presencia de agua libre como de agua disuelta. El aceite lechoso o

emulsionado en presencia de altas temperaturas y agitación forma gomas y lodos que taponan las tuberías, boquillas y enfriadores, dando lugar a una falla grave en el equipo. Los puntos típicos de saturación para diferentes tipos de aceite son: hidráulicos: 300 ppm (0.03 % vol.); circulantes: 400 ppm (0.04 % vol.); transformadores: 500 ppm (0.05 % vol.).

El agua puede penetrar al aceite por un mal almacenamiento; es muy frecuente dejar los tambores de 55 galones en posición vertical y a la interperie, debido a las dilataciones y contracciones que la carcaza presenta, como consecuencia de los cambios de temperatura entre el día y la noche, la humedad y el agua fluyen a través de la tapa y el tapón hasta el aceite, de tal forma que cuando se vaya a utilizar se tiene un aceite con un alto grado de descomposición. De ser imprescindible el almacenamiento a la interperie, los tambores se deben colocar en posición horizontal.

En la mayoría de los equipos el contenido máximo permisible de agua en el aceite es de 0.2 % por volumen Las técnicas más comunes par determinar el contenido de agua en el aceite son: ensayo de crepitación (agua libre), centrifugación (agua libre), Karl Fischer (agua libre y agua disuelta) y destilación (agua libre y disuelta).

Los métodos más usuales para eliminar el agua del aceite son: coalescencia (es lento, simple y sólo separa agua libre), centrifugación (es costoso, requiere alto mantenimiento y sólo separa agua libre), absorción (es simple y separa agua libre y algo en solución), deshidratación en vacío (se utiliza para procesar grandes cantidades de aceite).

Separa agua libre y en disolución. La absorción y la deshidratación por vacío son los mejores métodos de eliminación de agua a un costo mínimo y con gran facilidad de utilización.

3. Materiales como el cobre. Los fabricantes de maquinarias son muy propensos a utilizar en los sistemas de circulación de aceite materiales como las tuberías de cobre por sus propiedades de maleabilidad.

   Sin embargo pasan por alto que este material es uno de los mejores

aceleradores de la oxidación del aceite, peor aun si trabaja a altas temperaturas. En su lugar deben utilizarse tuberías de acero inoxidable.

4. Contaminación con sólidos. El equipo deberá contar con un buen sistema de filtración

Figura 3.3: Parámetros que influyen en la rápida oxidación de un lubricante

3.4. Grasas lubricantes

- Ventajas de las grasas versus los aceites
  - La construcción y el diseño son menos complejos
  - A menuo representan menores costos de mantenimiento al ser posible la lubricación de por vida en algunos casos
  - Menor riesgo de fugas y juntas de estanqueidad más sencillas
  - eficaz obturación gracias a la salida de la grasa usada, es decir la formación de cuellos de grasa

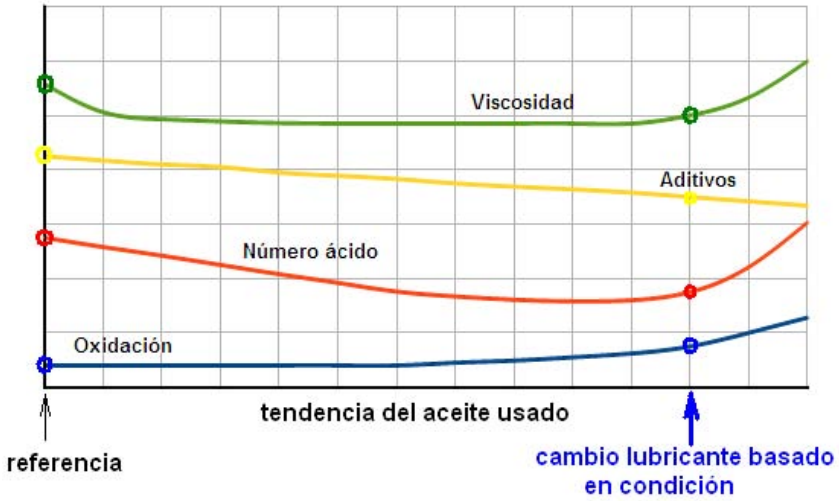


Figura 3.4: Tendencias de variación de algunos parámetros en un lubricante en función del tiempo

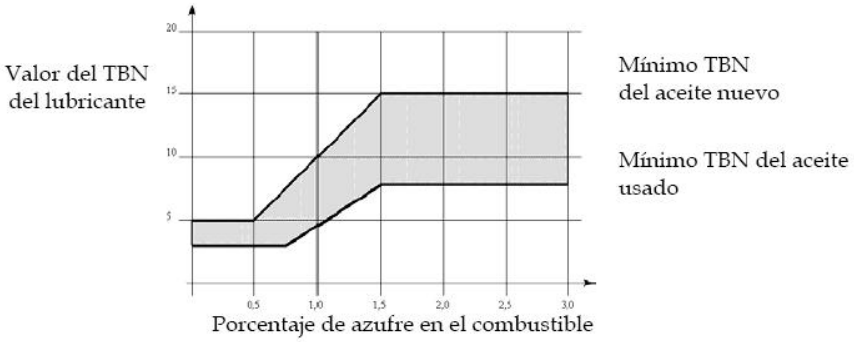


Figura 3.5: TBN recomendado en función del contenido de azufre en el combustible

	Disminución del punto de inflamación	Aumento del punto de inflamación
Cambios en la estructura del lubricante	Craqueo térmico.	Polimerizaciones.
Contaminación	Combustibles. Añadido de aceite de distintas propiedades.	Agua. Residuos carbonosos. Glicoles. Mezcla con aceite de distintas propiedades.
Pérdidas del lubricante	-----	Evaporación térmica. Deshidratación por vacío.

Figura 3.6: Factores que modifican el punto de inflamación de un lubricante

- con grasas para altas velocidades cantidades de grasa dosificada y un proceso de rodaje, pueden obtenerse bajas temperaturas del cojinete a elevadas velocidades de funcionamiento

- Desventajas de las grasas versus los aceites
  - no es posible la evacuación de calor
  - la película de grasa absorbe las impurezas y no las expulsa sobre todo en el acaso de lubricación con cantidades mínimas de grasa
  - Según el actual nivelde conocimientos, menores números límites de revoluciones o bien factores de velocidad admisibles en conpensación con la lubricación por inyección de aceite y la lubricación por pulverización.

La grasa es un producto que va desde sólido hasta semifluido y se obtiene por la dispersión de un agente espesante (jabón metálico) en un líquido lubricante (aceite base). La composicion de la grasa se puede definir como:

El aceite le confiere a las grasas sus características lubricantes y el espesador le da determinadas propiedades físicas, tales como la capacidad de soportar altas temperaturas, humedad, ácidos y otros tipos de contaminantes. Se podría decir que una grasa es una especie de esponja (espesador), saturada de aceite, que a medida que trabaja lo dosifica sobre el mecanismo que está lubricando.

Las grasas poseen coeficientes de fricción más bajos que los aceites que se utilizan en su fabricación, especialmente en condiciones de lubricación

Cuadro 3.3: Composición de una grasa

Aceite base	+ agente espesante:	+ Aditivo.
- Mineral - Sintético	- jabón (calcio, sodio, litio, etc.) - no contiene jabón (ar cilla,gel)	- Adhesividad, - antioxidante, - anticorrosivo, - antidesgaste, - extrema presión, - colorantes, - antiespumante, - estabilizador.

límite. Por lo tanto, se consume menos energía con grasa que con aceite.

Cuando los aceites se calientan su coeficiente de fricción sólida (pérdida de la película lubricante) aumenta considerablemente; lo mismo ocurre con las grasas, pero en un grado mucho menor.

En la mayoría de los casos, los rodamientos lubricados con grasa funcionan a una temperatura menor y por lo tanto, el consumo de potencia es mínimo. En una fábrica en donde existan muchos rodamientos, el ahorro de energía puede ser significativo.

Asi, por ejemplo, un rodamiento de rodillos de $100mm$ de diámetro exterior, girando a $1500rpm$. consume aproximadamente $0{,}11KW$ lubricado con grasa y $0{,}33KW$ si se hace con aceite. El consumo de potencia se refleja en la temperatura de operación del rodamiento. Por consiguiente, la grasa es el camino más eficaz y económico para reducir el consumo de energía y el desgaste.

3.4.1. Espesadores

Una grasa se fabrica a partir de una base metálica (o jabón), ya sea de calcio, aluminio, litio, sodio, bario, etc., que es sometida a un proceso de calentamiento en donde se le añaden ácidos grasos o hidr6xidos. De aqui resulta un espesador, el cual se mezcla con el aceite en un agitador y la mezcla resultante se calienta de nuevo.

Durante la reacción se produce glicerina y agua, ésta se vaporiza, de-

jando sólo la glicerina, la cual ayuda a que el espesador se solubilice en el aceite. Una vez solubilizado éste, la mezcla se enfría y el espesador pasa a estado de cristalización, en la forma deseada.

Dependiendo de la velocidad de enfriamiento y del medio en el cual se lleva a cabo, se obtiene la estructura de la grasa, la cual puede ser de fibra corta, media o larga. Esta estructura permite utilizarla aproximadamente para cada caso en particular. El tipo de fibra se puede determinar mediante la ayuda del microscopio.

La fabricación de la grasa consta de los siguientes procesos:

1. Saponificación: preparación del jabón.
   - En autoclave o saponificador
   - Presi6n de 2 a 6 bares
   - Temperatura entre 80° y 250°C (según el tipo de jabón).
2. Cocción:
   - Calentamiento progresivo y controlado
   - Se anade aceite, segun la clase de grasa
   - Extracci6n de vapores
   - Ajuste de alcalinidad
3. Enfriamiento:
   - Se adiciona aceite hasta lograr la penetraci6n deseada
   - Agitación mecánica lenta
   - Adición de colorantes y aditivos
4. Desaireación y alisado:
   - Homogenización y vacío
   - Molino coloidal
   - Laminación

Las propiedades de los espesadores dependen de las bases metalicas (jabones) utilizadas. Las bases metálicas son las que dan las características físicas que se quieren lograr en la grasa.

3.4.2. Tipos de espesantes (jabones metálicos)

- Sodio. Su contextura es fibrosa y muestran buen rendimiento a temperaturas moderadamente altas, soportan mayor batimiento, vibración y agitación sin sufrir ninguna alteración o separación. Poseen buena resistencia a la oxidación. La temperatura de goteo es aproximadamente de 170°C, para un contenido de jabón metálico entre un 14 y 18 %. Se recomiendan para una temperatura máxima de operación contínua comprendida entre 0° y 80°C. Se descomponen fácilmente con el agua. Presentan un buen desempeño en la lubricación de rodamientos de motores eléctricos. Las de baja consistencia se utilizan en plantas textiles, debido a que se pueden remover fácilmente del producto terminado, durante los procesos de lavado.

- Calcio. Contienen agua de hidratación, la cual utilizan para su estabilidad. Son resistentes al efecto del lavado por agua; sin embargo, no la absorben y esto hace que sus propiedades anticorrosivas sean diferentes y sea indispensable recubrir completamente los mecanismos lubricados. Se recomiendan donde las condiciones de batido, vibración y agitación no sean críticas. Se emplean entre 10° y 55°C para un contenido de calcio entre 21 y 25 %. Las frecuencias de relubricación son cortas.

- 12-hidroxyestearato de calcio. No utilizan agua de hidratación y se recomiendan para aquellas aplicaciones donde la grasa puede estar accidentalmente en contacto con alimentos. Se utilizan hasta temperaturas maximas de operación de 121°C.

- Complejos de calcio. Le confieren a la grasa propiedades de EP sin necesidad de agregarles este tipo de aditivo. El estearato acetato de calcio y las sales de acido acético se emplean como modificadores de los jabones de calcio. El punto de goteo está sobre los 250°C; sin embargo, se endurece a bajas temperaturas.

- Litio o multiproposito. Tiene un rango de trabajo comprendido entre 20° y 80°C, para un contenido máximo de litio entre 9 11 %. Poseen buena resistencia al lavado por agua, pero no ofrecen una protección adecuada contra la corrosión. Las que contienen estearato de hidróxido de litio son especialmente útiles para condiciones de alta temperatura y ambientes húmedos. Se conocen también como grasas de uso múltiple o multipropósito y sustituyen a las de calcio y de sodio.

- Compleja de litio. Presentan puntos de goteo hasta de 250ºC, excelente estabilidad mecánica y excelente resistencia al agua.

- Aluminio. Poseen buena resistencia al lavado por agua, buenas características antiherrumbre y excelente adhesividad. Se emplean hasta 77ºC. Su alto costo limita su uso.

- Compleja de aluminio. Tienen elevados puntos de goteo y elevada resistencia al agua, muy buena bombeabilidad debido a su estructura fibrosa corta, y buena estabilidad mecánica.

- Bario. Fueron las primeras grasas multipropósito, debido a su estabilidad a altas temperaturas y a su buena resistencia al lavado por agua. La temperatura máxima permisible de trabajo es de 100°C. Debido a su alto contenido de jabón, pueden causar problemas en sistemas de distribución de grasa, en rodamientos que giran a altas velocidades o en mecanismos que funcionan a bajas temperaturas.

- Base mixta. Sus propiedades dependen del porcentaje de sus componentes, asi como del método de fabricación. Se utilizan poco porque el fin que se persigue con ellas es obtener las características de las diferentes clases de jabones en uno solo. Esto raras veces se logra, por lo cual es mas práctico utilizar una grasa de un jabón específico que da mejores resultados a un menor costo.

- Sin jabón metálico. Utilizan como espesante el negro de humo, gel de sílice, alquilos de urea y arcillas modificadas. Poseen un elevado punto de goteo y las temperaturas máximas de trabajo están por el orden de los 200°C. Sin embargo, a estas temperaturas resulta práctico hacer una evaluación y seguimiento del producto, con el fin de determinar si es mejor y más económico utilizar grasas sintéticas. Su rata de oxidación es mas baja que las fabricadas con otros espesadores. La oxidación depende del aceite base y son resistentes al lavado por agua.

- Bisulfuro de molibdeno (MoS2). Ofreccn buenas caracteristicas cuando están somcetidas a cargas críticas, reducen la fricción y el desgaste, tienen buena adhesividad y resisten el lavado por agua. Su principal aplicación es en cojinetes de fricción, rodamientos, articulaciones y husillos. La película lubricante persiste durante largo tiempo, lo cual permite prolongados intervalos entre relubricaciones. Si la base lubricante es sintética se pueden emplear hasta 370°C. No se deben utilizar

con mecanismos de bronce porque, si hay presencia de agua, el MoS2 se puede volver agente corrosivo.

- Poliurea. Se obtienen de combinaciones orgánico sintéticas. Poseen excelente resistencia al envejecimiento y las temperaturas de servicio están comprendidas entre 30° y 175°C. Su mayor aplicación se presenta para condiciones de alta temperatura, altas cargas y elevadas velocidades de giro. Tienen la notable propiedad de ser más viscosas a clevada tempcratura y volver a sus condicioncs normales en temperatura ambiente.

- Bentonita. Están compuestas de aceites sintéticos y espesantes de bentonita. Permiten temperaturas máximas comprendidas entre 20° y 170°C. Buena estabilidad al envejecimiento y comportamiento muy estable en presencia de agua.

- Sintéticas. Están constituidas por aceites sintéticos de elevado índice de viscosidad (195), bajo punto de fluidez (78°C) y practicamente saturados, con los que se obtienen grasas con unas temperaturas muy amplias de servicio, comprendidas entre 65° y 165°C y una excelente estabilidad térmica. En una maquinaria que funcione a elevadas temperaturas, es necesario relubricar con mayor frecuencia, lo cual puede resultar antieconómico, o utilizar grasas sintéticas que, aunque un poco más costosas que las convencionales, no se descomponen ni se deterioran rápidamente.

El capital invertido se recupera al ampliar las frecuencias de relubricación y al disminuir la fricción. Sobre la conveniencia o no de utilizar este tipo de grasas, juega un papel muy im-portante la experiencia y el criterio de selección que tenga la persona encargada do coordinar el programa de lubricación.

3.4.3. Aceite base

El aceite utilizado en la fabricación de la grasa se selecciona con las características similares del que se emplearía si el mecanismo fuese lubricado con éste y no con grasa. Basicamente se utilizan los aceites de tipo parafínico y nafténico. Los nafténicos se emplean ampliamente para grasas que trabajan a bajas temperaturas, por su fluidez y habilidad para combinarse con el jabón.

La viscosidad del aceite base oscila entre 65 y 175 cSt, a 40°C (entre 300 y 800 SSU, a 100°F). Los de viscosidad baja se utilizan en grasas para temperaturas bajas y velocidades altas, mientras que los de viscosidad alta para condiciones de velocidades bajas, cargas altas y de impacto.

La relación viscosidad temperatura del aceite base es importante para aquellas condiciones de operaci6n donde hay fluctuaciones de temperatura.

Los aceites sintéticos se utilizan en grasas que trabajan en condiciones extremas de alta o baja temperatura y generalmente se utilizan con espesadores de jabón de litio. Cuando el espesador y el aceite base de la grasa son sintéticos, su uso se reduce únicamente a equipos que trabajan en condiciones extremas.

Los aditivos más comunes ulilizados en las grasas son los antioxidantes, los in-hibidores de la herrumbre y de la corrosión, y los aditivos de extrema presión (EP). Productos tales, como el Paratac, se añaden a las grasas para incrementar su adhesividad y cohesión y para darle una mejor retención en los rodamientos.

3.4.4. Consistencia de las grasas

Depende de la viscosidad del aceite y del contenido del espesador que posea, el cual puede fluctuar entre un 5 y 30 %, o más, dependiendo del tipo de grasa. Dos grasas con igual consistencia o dureza, no tienen necesariamente igual desempeño. La consistencia es un factor importante de la grasa porque ella determina su capacidad de lubricación y sellamiento, de permanencia en su sitio, de bombeabilidad, y capacidad de soportar temperatura.

Se determina según el método ASTM D217, conocido como cono de penetración de las grasas lubricantes y establecido por el NLGI (Instituto Nacional de Grasas Lubricantes). Este método permite hallar la consistencia de una grasa en términos de penetración, sin agitación (durante el almacenamiento). Las grasas fluidas y semifluidas, con una penetración ASTM por encima de 475, no se prueban con el penetrómetro.

3.4.5. Selección de la grasa

Se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

Cuadro 3.4: Clasificación ASTM y consistencia NLGI

Penetración trabajada ASTM en mm/10 25°C (77°F)	Consistencia NGLI	Grado de dureza	Campo Aplicación
447-475	000	muy fluída	engranajes
400-430	00	fluida	engranajes
355-385	0	semifluída	rodamientos, sistema centralizado
310-340	1	muy blanda	rodamientos, sistema centralizado
268-295	2	blanda	rodamientos
220-250	3	media	rodamientos
175-205	4	dura	cojinetes lisos. Grasa en bloque
130-160	5	muy dura	cojinetes lisos. Grasa en bloque
85-118	6	durísima	cojinetes lisos. Grasa en bloque

- Consistencia. Los grados NLGI que se emplean comúnmente son 1, 2 y 3.

- Tipo de espesante. Los más utilizados son los de litio, sodio y calcio.

- Viscosidad dinámica. Se especifica de acuerdo con la velocidad y la temperatura de operación del rodamiento.

- Factor de velocidad. Es característico de cada grasa y siempre debe estar por encima del que se obtiene de multiplicar el diámetro medio del rodamiento en mm por la velocidad de giro en rpm (nd_m). En la figura 3.7 se pueden apreciar los valores de nd_m para diferentes tipos de grasas, en función de la temperatura de operación y de la viscosidad del aceite base.

  Este factor de velocidad de la grasa es importante tenerlo en cuenta porque, si éste es mayor que el del rodamiento, se podrá garantizar que durante el funcionamiento de éste, la grasa no será desplazada por fuerza centrífuga de las pistas de rodadura, evitándose así una

lubricación deficiente y la posibilidad de que se manche el producto que se está fabricando.

- Temperatura de trabajo. Es función del grado NLGI do la grasa y del tipo do jabón.
- Aditivos. Es necesario tener en cuenta si la grasa requiere EP o no, de acuerdo con el tipo de cargas que se pueden presentar en operación.
- Sistema de aplicación. Influye en la consistencia de la grasa. Asi, para sistemas de lubricación centralizada, por lo regular es NLGI 0 o NLGI 1; para reengrase es 2, y para sistemas de grasa empacada es 3.

Los datos que normalmente dá el fabricante de un equipo para seleccionar la grasa, son: consistencia, tipo de jabón, temperatura de goteo y aditivos. Con estos parámetros conocidos, se busca la más adecuada en el catálogo del fabricante de grasas. Si la velocidad de giro es alta, surge como muy importante tener en cuenta el factor de giro, para lo cual es necesario calcularlo primero para el rodamiento y compararlo luego con el de la grasa.

3.4.6. Miscibilidad de las grasas

Debe evitarse mezclar grasas de diferentes marcas o especificaciones porque en muchos casos, tanto los espesadores, el aceite base y los aditivos son incompatibles y pueden reaccionar desfavorablemente, descomponiendo la grasa resultante.

Solamente son compatibles las grasas de jabon de calcio y de litio (CALI), siempre y cuando los aceites bases sean del mismo tipo (parafínicos, naftémicos o sintéticos).

Para evitar problemas de contaminación de una grasa con otra, es necesario que cada una de ellas se aplique con su respectiva pistola engrasadora. Cuando se vaya a cambiar una grasa por otra, se debe limpiar el mecanismo de tal forma que no queden trazas de la grasa anterior.

Las grasas a base de aceite mineral han demostrado perfecta inalterabilidad frente a plásticos, elastómeros, pegamentos, lacas u otros materiales de construcción.

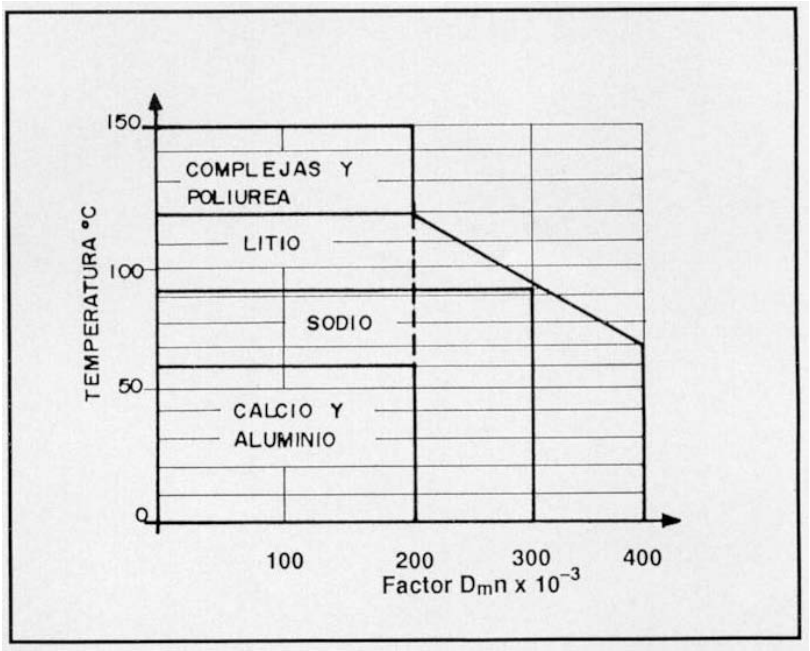


Figura 3.7: Determinación de factor de giro nd_m en función de temperatura de operación

Viscosidad del aceite base	Baja: hasta 68 cSt/40°C	200.000	300000	400.000
	Media: entre 100-150 cSt/40°C	150.000	200.000	300.000
	Alta: entre 220-680 cSt/400°C	100.000	150.000	250.000

Figura 3.8: Relación entre viscosidad y factor de giro (nd_m)

Figura 3.9: Izquierda: Grasa nueva. Derecha: grasa contaminada con agua (apariencia lechosa)

Cuadro 3.5: Contaminación del aceite de un motor

Tipo de Contaminante	Fuentes típicas	Posible problema
Partículas metálicas	Desgaste del motor	Abrasión contínua, fatiga, falta de lubricante
Oxidos metálicos	Desgaste de motor y corrosión	Abrasión, fatiga, corrosión
Arena y polvo	Fuga de gases de la combustión	Abrasión, fatiga
Hollín	Fuga de gases de la combustión	Degradación de lubricante, depósitos, falla de vibración
Combustible	Fuga de gases de la combustión	Degradación del lubricante falla de viscosidad
Agua	Fuga de gases de la combustión	Corrosión degradación del lubricante
Acidos	Fuga de gases de la combustión y falla de lubricante	Corrosión, degradación del lubricante

Capítulo 4

Cables y cadenas

4.1. Lubricación de cables

4.1.1. Tipos de cables

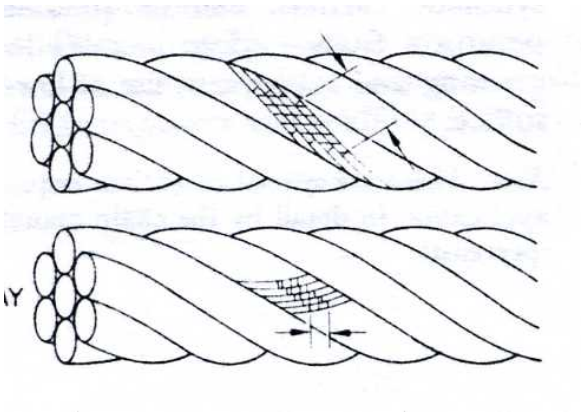


Figura 4.1: Formas clásicas de trenzado de cables a) Torzal Langs b) Torzal regular

4.1.2. Lubricación

Una correcta lubricación en un cable impide el contacto metal metal entre los alambres que lo conforman y debe evitar que actúe la corrosión. Sus funciones se reducen a:

- reducir la fricción en el movimiento relativo entre los torones.

- lubricar y proteger contra la corrosión el núcleo y los torones
- proteger contra la corrosión externa del cable

Se usan generalmente los siguientes tipos de lubricantes:

- Aceites
- Grasas
- lubricantes asfalticos
- compuestos de petróleo
- Lubricantes de película sólida
- amalgamas de partículas metálicas

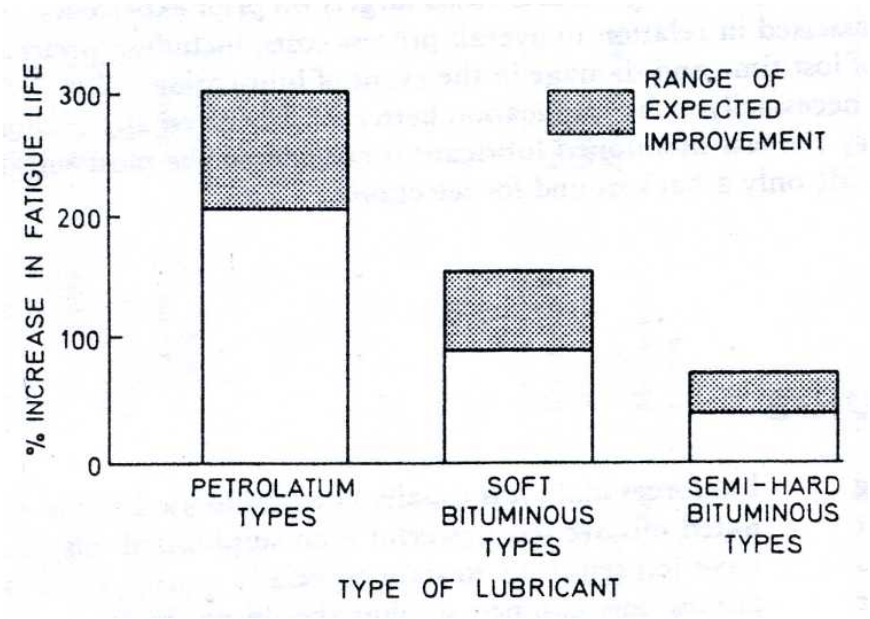


Figura 4.2: Porcentajes de incremento a la vida a la fatiga en cables correctamente lubricados respecto a un estado de lubricación deficiente

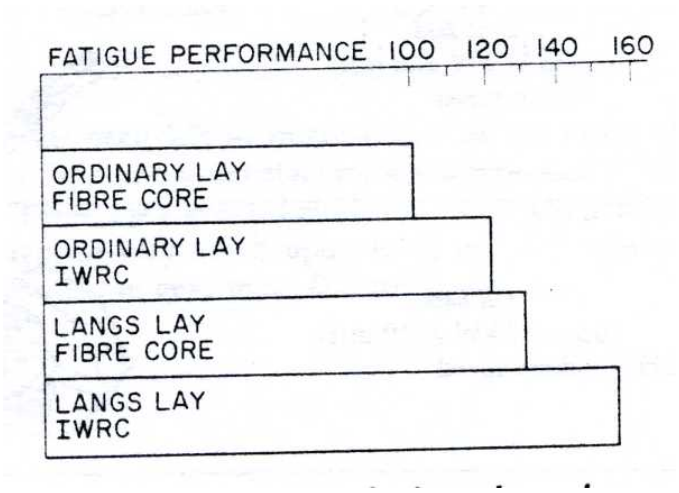


Figura 4.3: Comparación de vida a la fatiga en base a la disposición de los alambres en el cable

4.1.3. Métodos de lubricación

Condición fundamental para una lubricación eficiente es la limpieza del cable. ello se puede lograr con cepillos de alambre, petróleo, gasolina, vapor o aire comprimido. después de la limpieza, el cable se debe secar y relubricar de inmediato para prevenir la herrumbre. Los métosdos más empleados son:

- Manual.
- Con depósito de aceite caliente
- Con poleas en depósito metálico
- Con depósito en una polea por donde gira el cable
- Con corriente de aire a prsión y/o spray
- Con lubricador gota a gota
- Por presión

Mecanismo	Tipo de Servicio	Viscosidad del aceite en cSt, a 40°C
Grúas, dragas y palas mecánicas. Plataformas para transportar productos terminados en hornos.	Trabajo pesado y de baja velocidad.	80.000 - 270.000 (asfálticos)
Ascensores, malacates, polipastos, etc.	Para subir y bajar cargas a velocidades moderadas.	100 -220 (grado ISO) Con aditivos EP *
Vagonetas para transportar minerales en minas horizontales o inclinadas.	Trabajo pesado a velocidades moderadas y bajas.	5.000 - 26.000 (asfálticos)
Tranvías aéreos, funiculares y cables para exploraciones forestales.	Cables estacionarios sometidos a la acción del agua, polvo, humo o sustancias químicas.	26.000 - 80.000 (asfálticos)
	Trabajo pesado y ambiente poco contaminado.	Lubricantes de película sólida (grafito y bisulfuro de molibdeno) pulverizados con una corriente de aire a presión.
Líneas de transporte de materiales por el suelo	Trabajo pesado y ambiente altamente contaminado.	No se lubrican.

• O emplear lubricantes de película sólida. En caso de que eñ cable esté a la interperie, es mejor utilizar un lubricante asfáltico de una viscosidad comprendida entre 5000 - 26000 cSt a 40ºC

Figura 4.4: Selección de lubricante para aplicaciones de cables metálicos de acuerdo al tipo de servicio

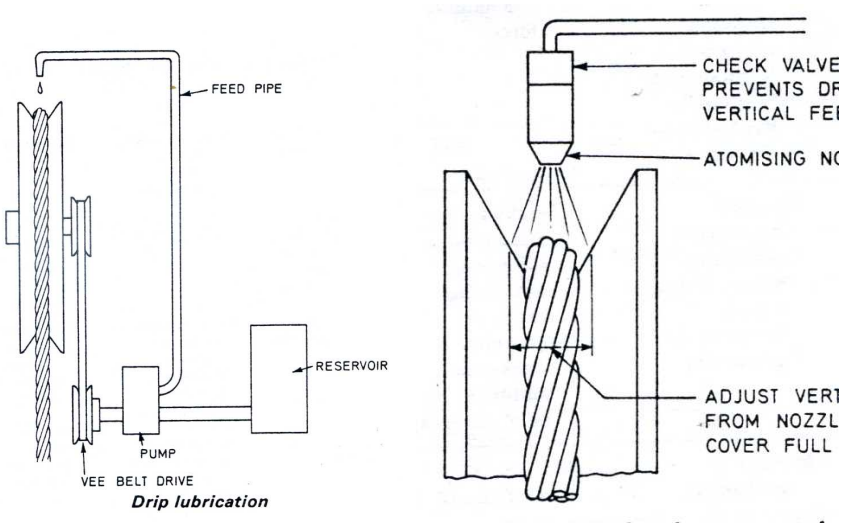


Figura 4.5: a. Lubricación por goteo, b.Lubricación tipo spray con tobera

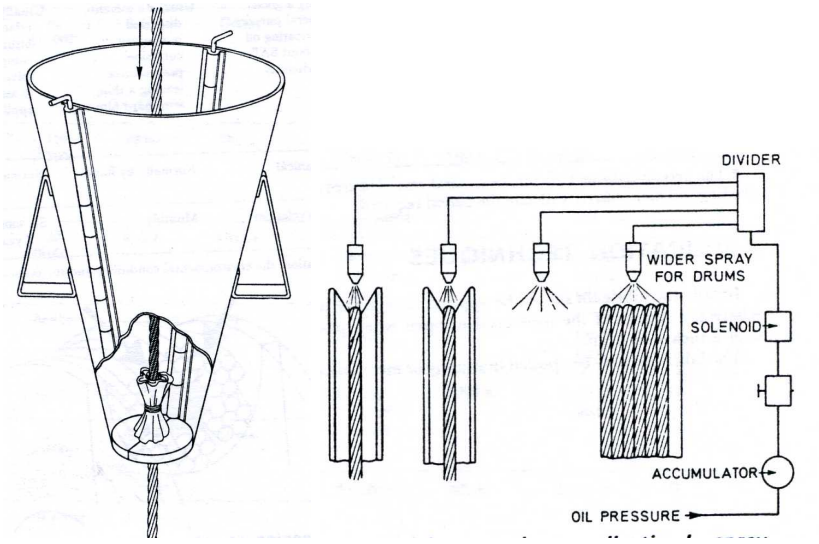


Figura 4.6: a. Lubricación con ayuda de una artesa, b. Lubricación por presión

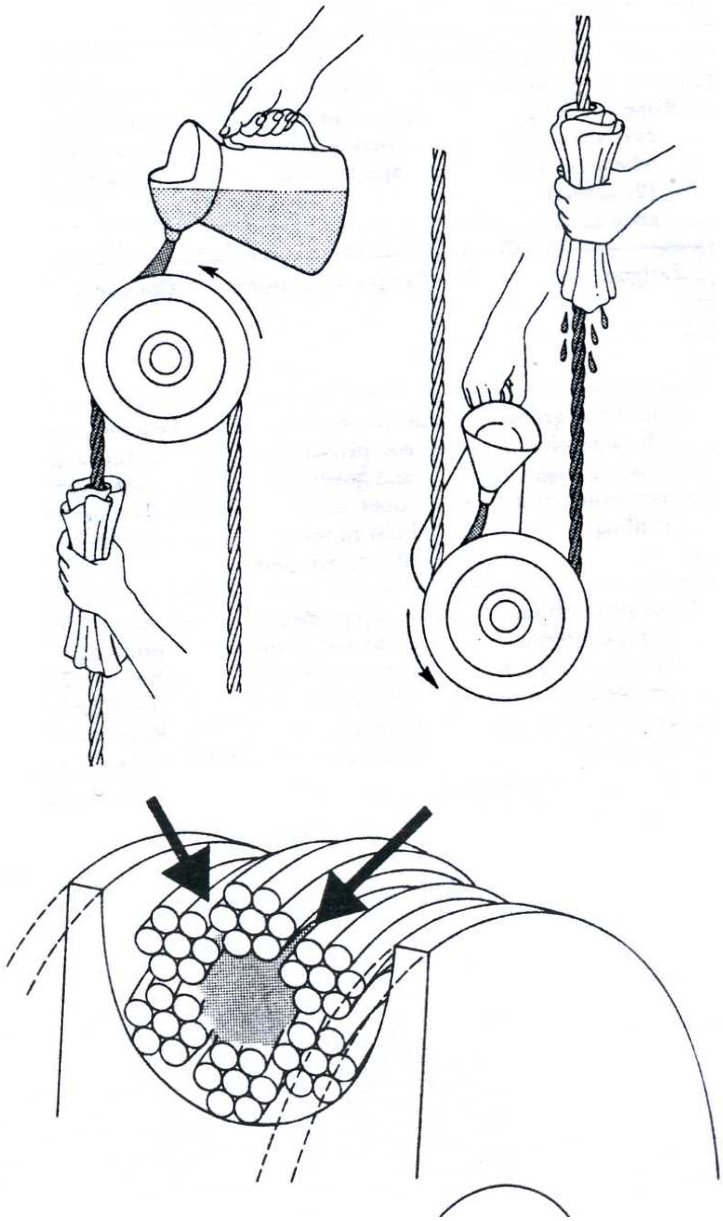


Figura 4.7: Aplicación manual del lubricante

4.2. Cadenas

Se entiende por cadena a un conjunto de varios pares de elementos rígidos, unidos por articulaciones de forma que el movimiento de cualquiera de ellos provoca el movimiento de todos los demás. Se tiene una cadena cinemática cerrada cuando el primer elemento del primer par esta rígidamente unido al segundo elemento del último par. La figura 4.9 muestra los principales componentes del tipo de cadena tradicional formado por eslabones, pasadores y rodillos. Las cadenas se emplean en transmisiones de ejes paralelos para relaciones de transmisión de hasta 6: 1 con un rendimiento de alrededor de 97 %.

4.2.1. Tipos de cadenas

xisten muchos tipos o formas de cadenas. La figura 4.8 muestra algunos tipos clásicos de cadenas y se puede visulaizar sus principales partes componentes.

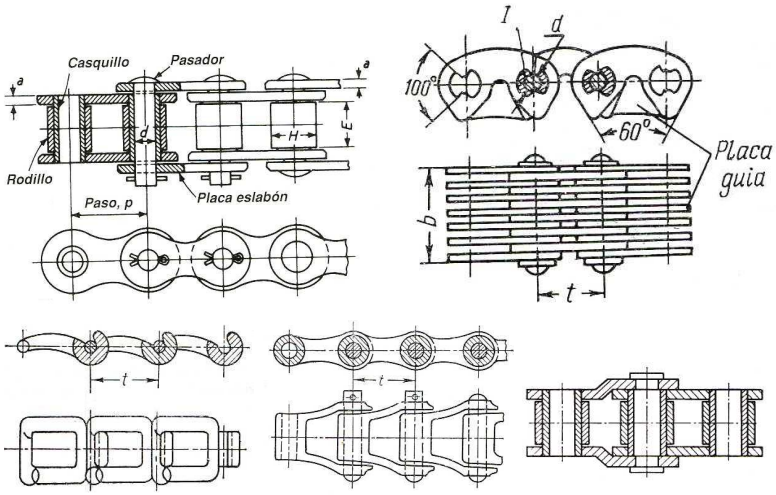


Figura 4.8: Tipos clásicos de cadenas comerciales: a. cadena de rodillos, b. cadena silenciosa, c. articulada desmontable, d. de pernos de acero, e. acodada para número impar de eslabones

4.2.2. Selección de cadenas

Los tipos de falla en una cadena son principalmente

- Fatiga en la placa de los eslabones, Impacto de los pasadores con los dientes al engranar raspaduras entre pasador y sus bujes

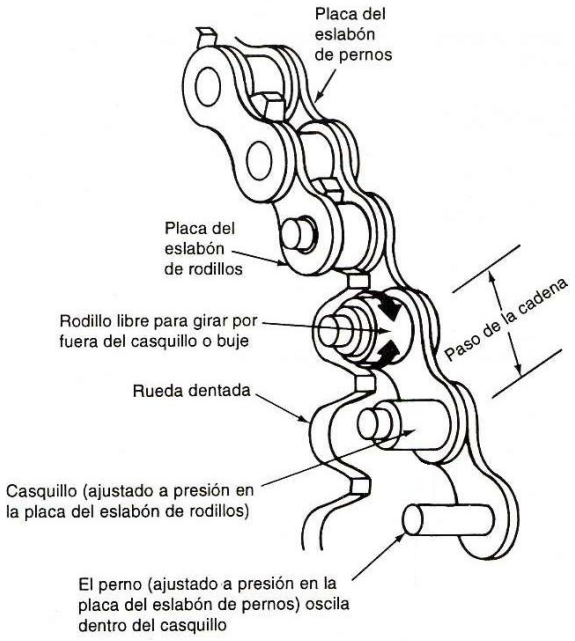


Figura 4.9: Forma constructiva de una cadena

Asimismo pse pueden plantear las siguientes observaciones de diseño:

- Las especificaciones se basan en la velocidad de la rueda más pequeña
- Para una velocidad dada, la capacidad en HP aumenta con el número de dientes
- Para un tamaño de rueda dada y un número de dientes, la capacidad de HP aumenta en función del incremento de velocidad hasta cierto punto y luego disminuye

Algunas consideraciones en la selección y/o diseño de cadenas se pueden resumir de la siguiente forma:

1. El número mínimo de dientes del piñón (sproket) debe ser en general mayor o igual a 17
2. Máxima relación de velocidades cercana a 7

Factores de servicio para transmisiones por cadena de rodillos

Tipo de carga conducida	Tipo de potencia de entrada: Máquina de combustión interna con transmisión hidráulica	Motor eléctrico o turbina	Máquina de combustión interna con transmisión mecánica
Suave	1.0	1.0	1.2
Choque moderado	1.2	1.3	1.4
Choque pesado	1.4	1.5	1.7

Clasificaciones de carga

Carga suave	Carga de choque moderado	Carga de choque pesado
Agitadores—Líquido puro	Maquinaria para el trabajo de la arcilla—Molinos de barro amasado	Maquinaria para el trabajo de la arcilla—Prensadora de ladrillos, maquinaria briqueteadora
Transportadores—Cargados o alimentados uniformemente (banda articulada, ensamblado, banda, paletas, horno, tornillo sin fin)	Transportadores—Trabajo pesado y cargados NO uniformemente (banda articulada, ensamblado, banda, cangilón, paletas, horno, tornillo sin fin)	Transportadores—Reciprocantes y agitadores
Ventiladores—Centrífugos y ligeros, diámetro pequeño	Grúas y malacates—Trabajo mediano, montacargas de cajón (movimiento de viaje y movimiento de carretilla)	Grúas y malacates—Trabajo pesado, incluyendo explotación forestal, beneficio de madera y equipo rotatorio para taladrar
Árboles de transmisión—Ligero	Dragas—Cable, carrete y transportador	Dragas—Transmisiones de cabezas cortadoras, transmisiones de guías, transmisiones de pantallas
Máquinas—Todos los tipos con cargas no reversibles uniformes.	Industria de alimentos—Rebanadoras de remolacha, mezcladoras de pasta, molinos de carne	Molinos de martillos
Pantallas—Ingestión de agua con rotación progresiva en el viaje (alimentada uniformemente)	Esmeriladoras	Máquinas—Prensa punzonadora, cizalla, cepilladoras
Equipo para la disposición de aguas de albañal—Servicio interno (alimentado uniformemente)	Industria de lavandería—Lavadoras, tambores giratorios	Máquinas—Todos los tipos con cargas de choque de impacto severo, o variaciones de velocidad y servicio en reversa
	Árboles de transmisión—Servicio pesado	Molinos de metal—Banco de estirar, máquinas conformadoras, tajaderas-transmisiones de pequeños trenes de laminación, estiradoras o aplanadoras de alambre
	Máquinas—Transmisiones principales y auxiliares	Molinos—(del tipo rotatorio) de bolas, hornos de cemento, laminadores de barras, molinos de tambor de frotación
	Máquinas—Todos los tipos con choque moderado y cargas no reversibles	Industria del papel—Mezcladoras, calandrias, laminadoras de caucho
	Pantallas—Rotatorias (piedra o grava)	Industria textil—Maquinaria cardadora
	Industria textil—Calandrias, maquinaria para teñir, planchadoras, perchadores, enjabonadoras, hiladoras, estructuras de tiendas	

Figura 4.10: Tabla que define factores de servicio

3. La distancia entre ejes entre 30 y 50 pasos
4. El arco de contacto de la polea menor debe ser menor o igual a 1200
5. En condiciones normales la rueda mayor debe ser mayor a 120 mm,
6. Se recomienda que línea que une centros de las ruedas sea horizontal con el lado tenso en la parte superior,
7. La longitud de la cadena debe ser un múltiplo del paso y se recomienda un número par de pasos,
8. Diámetro de paso de ruedas dentadas $D = \frac{p}{(sen(180/N)}$, donde p es el paso y N el número de dientes

Los pasos a seguir en la selección de la cadena cualquiera sea el fabricante deberán considerar los siguientes items:

1. Clasificación de la carga. Implica obtener el factor de servicio F_s del catálogo considerando el tipo de carga de la máquina. La figura 4.10 muestra una tabla dada por algún fabricante donde se puede obtener F_s en función de las características de las máquinas impulsoras e impulsivas.
2. Determinar la potencia de diseño P_d según: $P_d = P_n F_s$, donde P_n es la potencia nominal.
3. Con la potencia de diseño P_d y las rpm del piñón se entra en una gráfica que según la zona en que se encuentra especifica la cadena necesaria para esos requerimientos. Ver figura 4.11

4.2.3. Lubricación

La lubricación de los pasadores y sus rodillos es comparable a la de lso cojinetes lisos a muy baja velocidad. Para lograr una correcta lubricación en las cadenas de trabajo pesado, se deberá alcanzar condiciones de lubricación elastohidrodinámicas.

Las funciones del lubricante en una cadena son:

- Evitar el escoramiento, la formación de grano y finalmente el agarrotamiento entre la superficie del pasador y el buje.
- amortiguar el impacto entre el rodillo y los dientes de los sprokers enfriar la transmisión

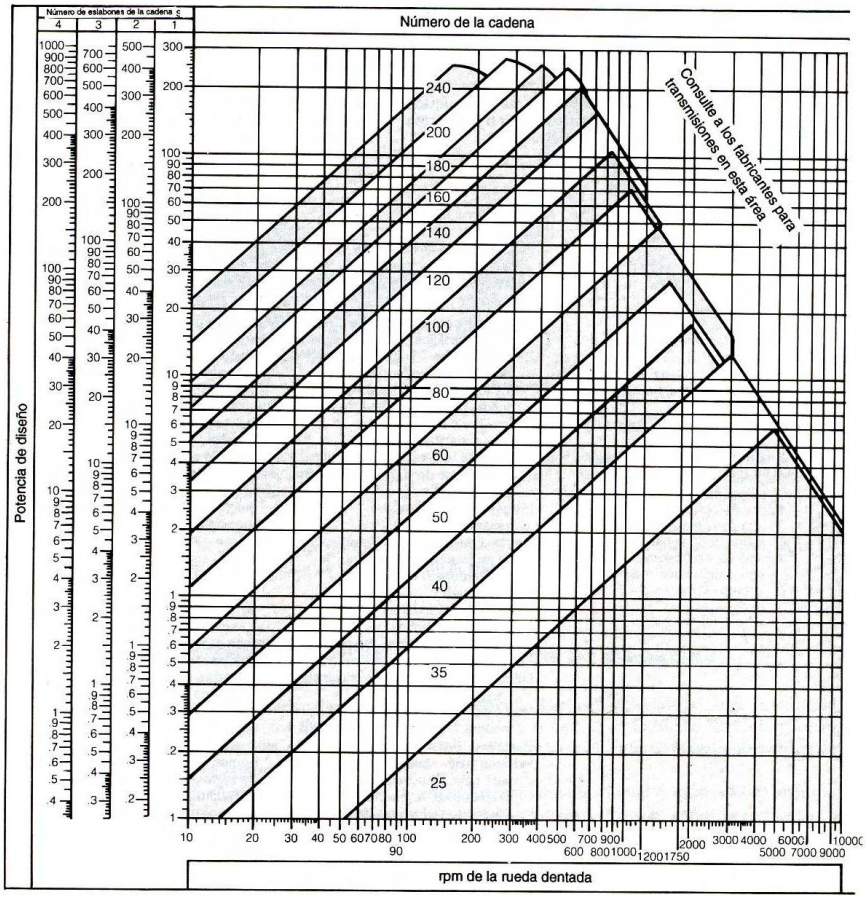


Figura 4.11: Potencia vs rpm

- evacuar partículas extrañas
- lubricar las superficies de contacto entre la cadena y el sproker

Los lubricantes más utilizados en estos casos son:

- Aceites lubricantes y de tipo Compound
- Grasas lubricantes
- lubricantes de película sólida como el bisulfuro de molibdeno y el grafito
- lubricantes asfálticos

Los métodos de lubricación dependen de factores dinámicos como:

- Velocidad ded funcionamiento
- Viscosidad del aceite
- Fuerza centrífuga
- Medio en el cual trabaja la cadena
- Manual
- cadenas que no se pueden desmontar
- Cadenas desmontables de la máquina

La selección del aceite se realiza en base a la Tabla mostrada en la figura 4.16

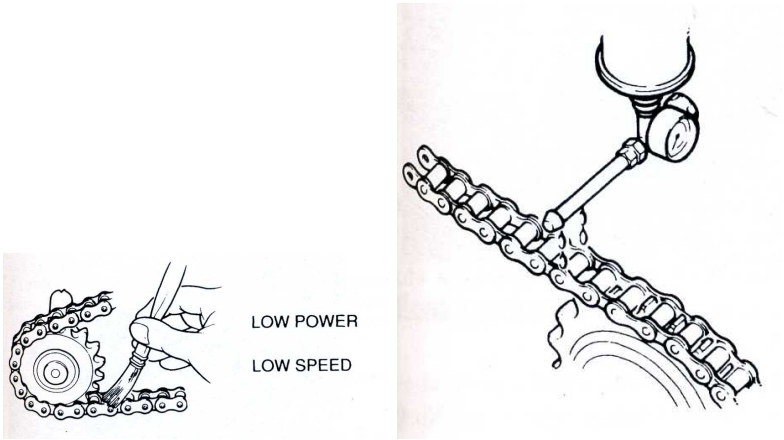


Figura 4.12: a)Lubricación con brocha, b) Lubricación por goteo

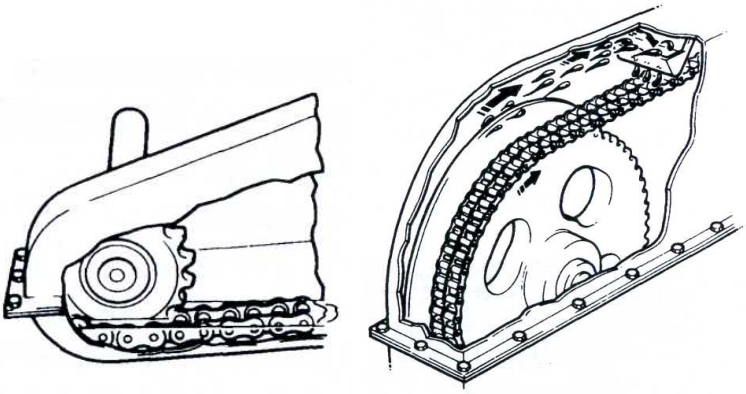


Figura 4.13: a. Lubricación por inmersión del sproker, b. Con ayuda de un disco de lubricación

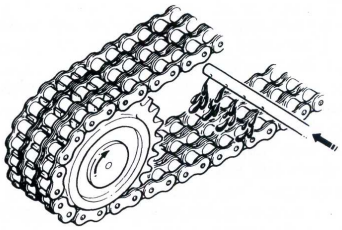


Figura 4.14: Por caida de corriente de lubricante sobre la cadena

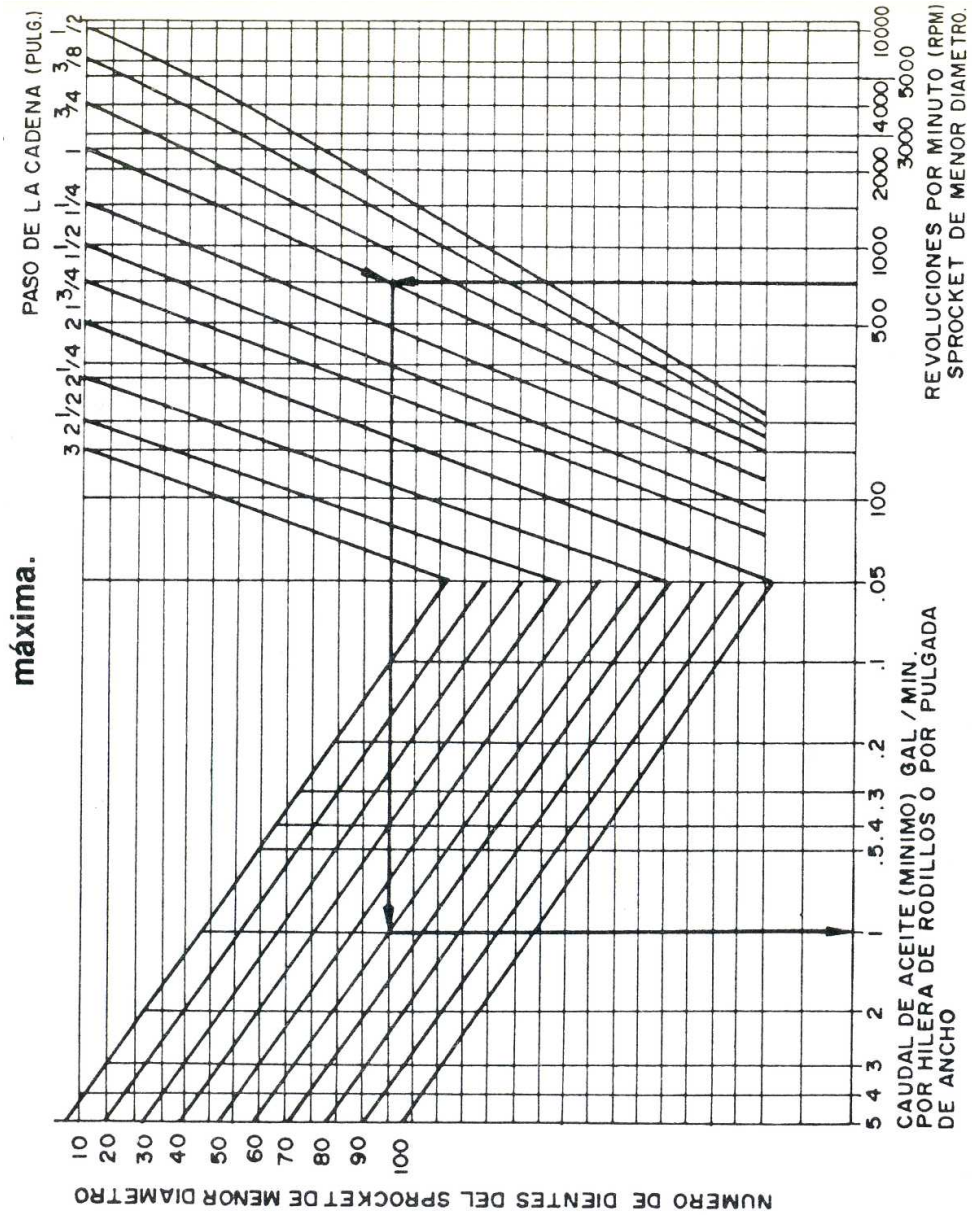


Figura 4.15: Cantidad mínima de aceite necesario para lubricar cadenas de rodillos y silenciosas de acero

Tipo de cadena	Tipo de servicio	Condiciones de operación	Método de lubricación	Temperatura media de funcionamiento °C	Grado ISO
Rodillos	Cadenas a la intemperie funcionando a bajas velocidades	Cadenas nuevas o usadas, en buenas condiciones, medio ambiente relativamente limpio	Manual con aceitera o por goteo	Por debajo de 4,50	46
Silenciosa					100
Rodillos				4,50 – 38	68 – 100
Silenciosa					100 – 150
Rodillos				Por encima de 38	150 – 220
Silenciosa					220 – 320
Rodillos		Cadenas viejas o gastadas, expuestas a la acción del polvo, la humedad, el agua o sustancias químicas		Por debajo de 4,50	68
Silenciosa					100
Rodillos				4,50 – 38	100 – 150
Silenciosa					150 – 220
Rodillos				Por encima de 38	220
Silenciosa					320
Rodillos	Cadenas recubiertas dentro de una guarda metálica, funcionando a bajas velocidades	Cadenas nuevas o usadas en buenas condiciones, medio circundante limpio	Por inmersión o por disco	Por debajo de 4,50	46
Silenciosa					100
Rodillos				4,50 – 38	100
Silenciosa					100 – 150
Rodillos				Por encima de 38	100 – 150
Silenciosa					150 – 220
Rodillos		Cadenas viejas o gastadas, expuestas a la acción del polvo, la humedad, el agua o sustancias químicas		Por debajo de 4,50	100
Silenciosa					100 – 150
Rodillos				4,50 – 38	100 – 150
Silenciosa					150 – 220
Rodillos				Por encima de 38	150 – 220
Silenciosa					320
Rodillos	Cadenas a la intemperie o protegidas por una guarda metálica bien hermética	Cadenas en buenas condicones y protegidas del contacto con materiales abrasivos o corrosivos	A presión o por circulación	Por debajo de 4,50	46
Silenciosa					46
Rodillos				4,50 – 38	68
Silenciosa					68
Rodillos				Por encima de 38	100
Silenciosa					150

Figura 4.16: Selección de la viscosidad del aceite requerido para lubricación de cadenas

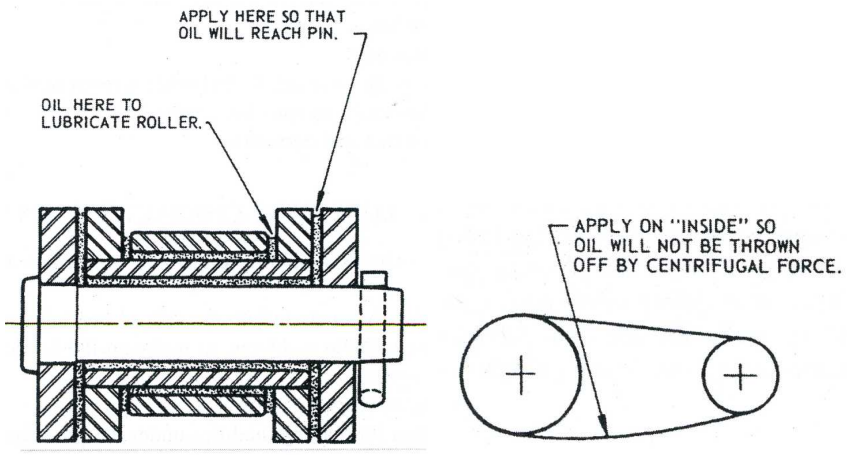


Figura 4.17: a) Superficies donde el lubricante deberá actuar entre los elementos de una cadena clásica, b) forma donde aplicar el lubricante

Temperature range, °F	Recommended viscosity grade
50 to +50	SAE 5
20 to +80	SAE 10
+10 to +110	SAE 20
+20 to +130	SAE 30
+30 to +140	SAE 40
+40 to +150	SAE 50

When the temperature range permits a choice, use the heavier grade.

Figura 4.18: Recomendación de la viscosidad del aceite en función de la temperatura

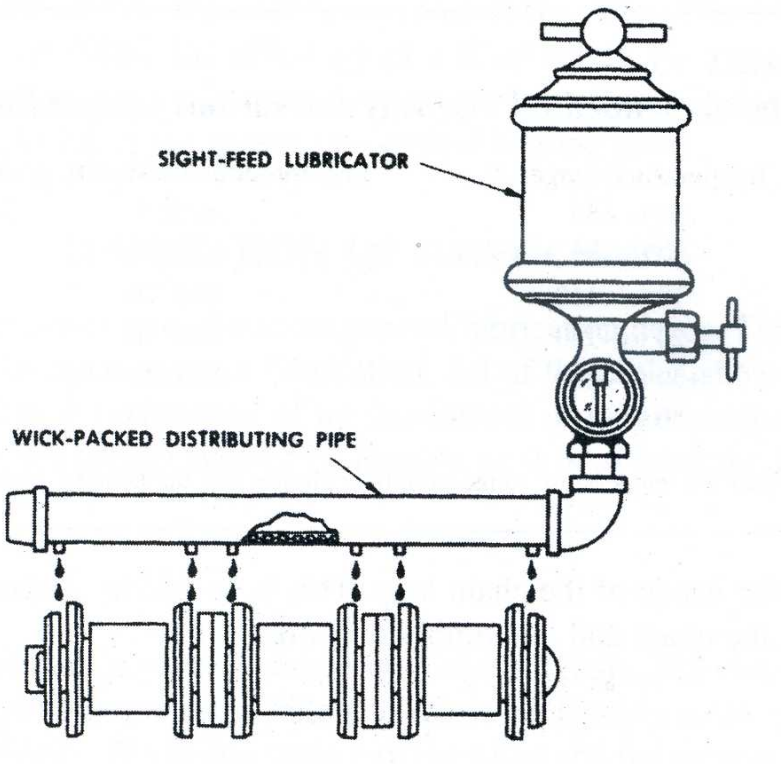


Figura 4.19: Lubricación por goteo

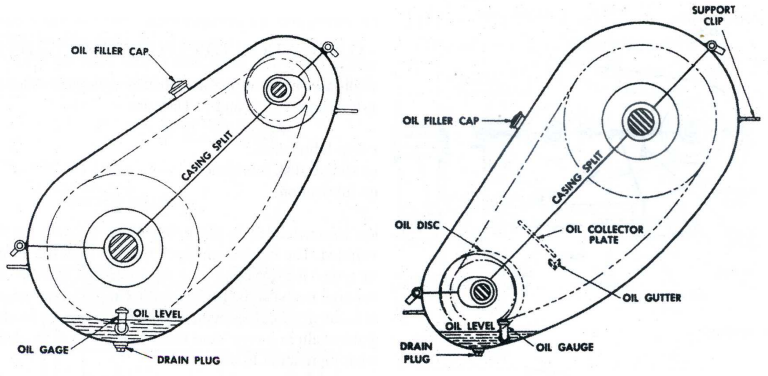


Figura 4.20: a) Lubricación por baño, b) lubricación con disco

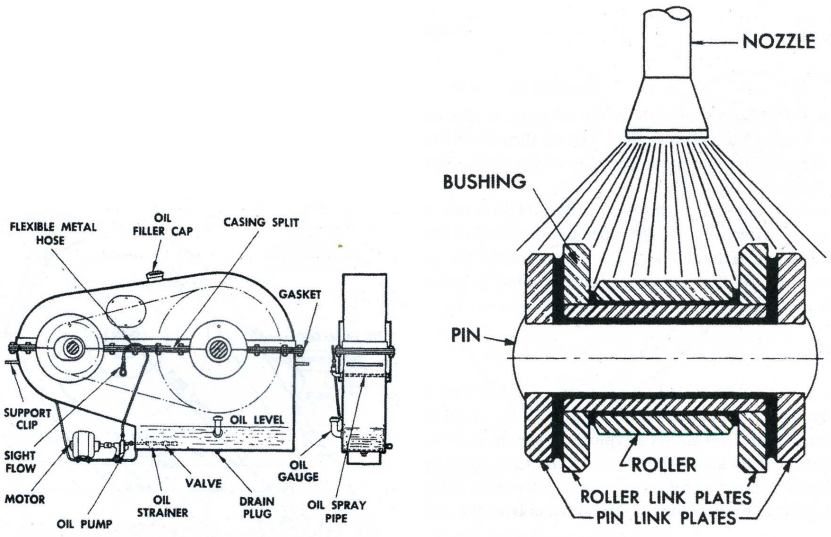


Figura 4.21: a) Lubricación por nube, b) detalle

Horsepower Transmitted	Minimum G.P.M. of Oil Required
50	1/4
100	1/2
150	3/4
200	1
250	1 1/4
300	1 1/2
400	2
500	2 1/2
600	3
700	3 1/4
800	3 3/4
900	4 1/4
1000	4 3/4
1500	7
2000	10

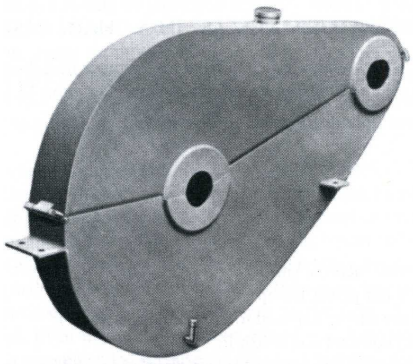


Figura 4.22: a)Flujo de aceite requerido, b) forma de la carcasa que contiene la transmisión por cadena

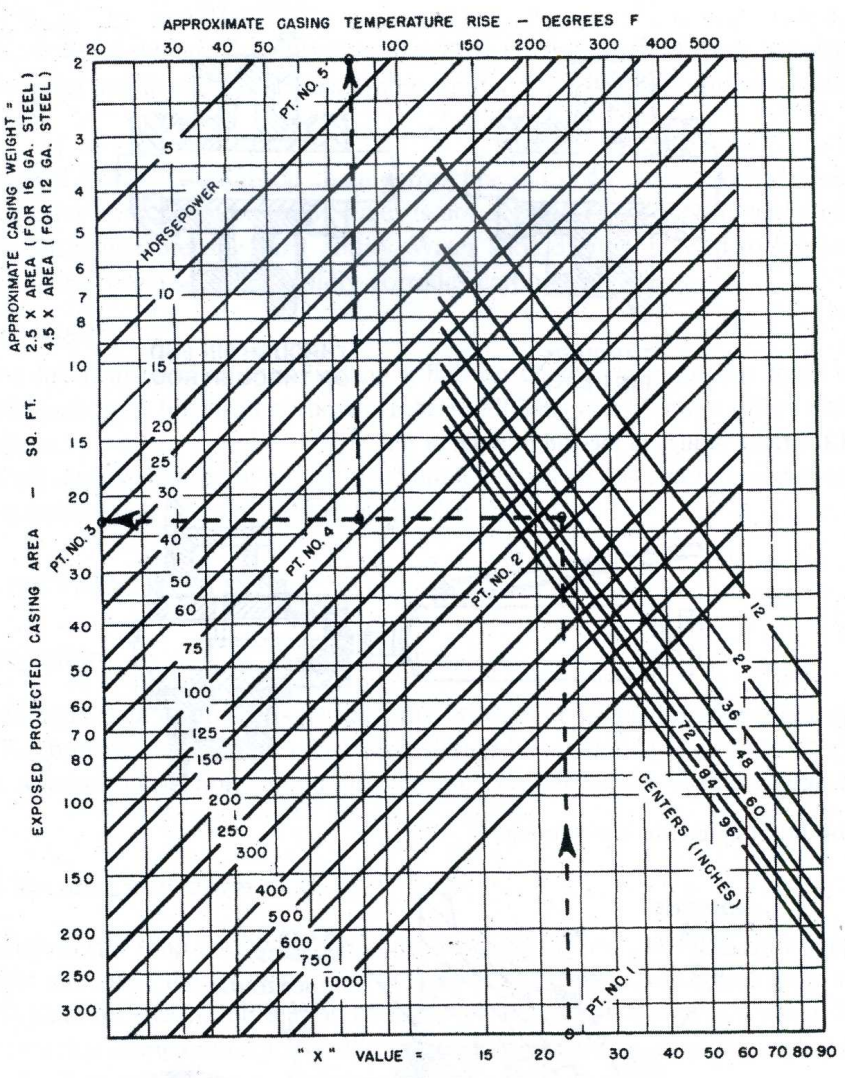


Figura 4.23: Estimación del área requerida en el interior del contenedor que protege la cadena

Capítulo 5

Rodamientos

5.1. Vida de un rodamiento

La vida útil de un rodamiento se puede obtener con el grado de exactitud siempre y cuando se tenga en consideración una serie de parámetros de operación. La fórmula básica para calcular la vida útil de un rodamiento está estandarizada por la ISO:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^k$$

donde L_{10} es la vida nominal en millones de revoluciones , C es la capacidad de carga dinámica entregada por el fabricante y expresa la carga que puede soportar el rodamiento alcanzando una vida nominal de 1,000,000 de revoluciones. Esa vida nominal se define como el número de revoluciones de un rodamiento antes de manifestar síntomas de fatiga superficial (pitting).

En general la información entregada por los fabricantes se basa en la vida alcanzada por el 90 % de los rodamientos aparentemente idénticos de un grupo suficientemente grande. En general la vida media de un rodamiento puede alcanzar hasta cinco veces la vida nominal.

P es la carga dinámica equivalente y se define como una carga hipotética constante de magnitud en magnitud y dirección que si actuara radialmente sobre un rodamiento radial, o axialmente y centrada sobre un rodamiento axial, tendría el mismo efecto en la duración del rodamiento que las cargas reales a las cuales está sometido dicho rodamiento. Se calcula de la ecuación: $P = XF_r + YF_a$, con F_r la carga radial real, F_a la carga axial real, X

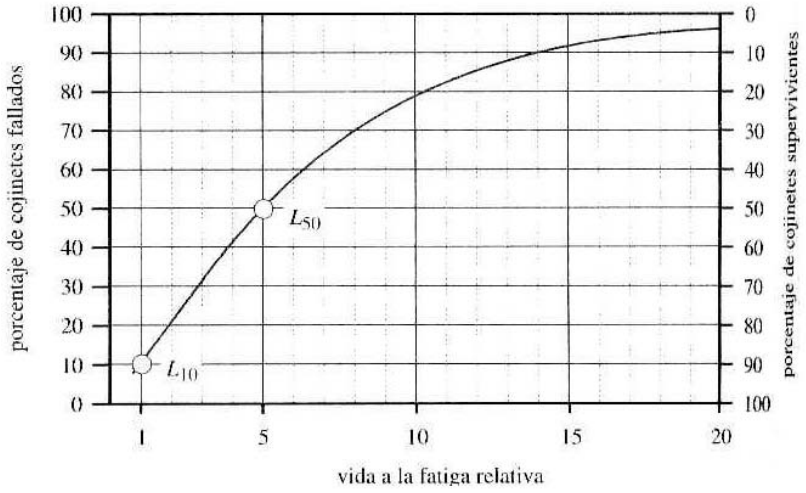


Figura 5.1: Estimación de vida estadística para rodamientos

factor de carga radial entregado por el fabricante e Y el factor de carga axial.

k es el exponente que vale 3 para rodamientos de bolas y 10/3 para rodamientos de rodillos. Tambien se acostumbra a usar la vida en horas de funcionamiento, y se designa por L_{10h} en horas de servicio:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P}\right)^k$$

Con n la velocidad de rotación en rpm. En el caso de rodamientos de vehículos de carretera se acostumbra a usar la fórmula L_{10s} en millones de kilómetros:

$$L_{10s} = \frac{\pi D}{1000} L_{10}$$

siendo D el diámetro de la rueda en metros.

5.1.1. Fórmula de vida nominal ajustada

Es conveniente considerar con más detalle la influencia de otros factores en la duración del rodamiento. ISO introdujo en 1977 la fórmula de vida ajustada:

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \ldots a_n L_{10}$$

donde L_{na} representa la vida nominal ajustada en millones de revoluciones. El subíndice n representa la diferencia entre la fiabilidad requerida y el 100 %. Fiabilidad es la probabilidad del rodamiento para alcanzar o sobrepasar una duración determinada.

a_1 es el factor de ajuste de la vida por fiabilidad,

a_2 es el factor de ajuste de la vida por el material. El rango aproximado para aceros de materiales especiales es entre 0,6 y 1,0.

a_3 es el factor de ajuste de la vida por las condiciones de funcionamiento. Para este valor se usan los siguientes factores:

- 1,0 para espesor de película lubricante similar a la rugosidad superficial
- $<$ 1,0 para $Dn <$ 10,000 y para viscosidades bajas del lubricante
- $>$ 1 para condiciones de lubricación favorables.

Está determinado esencialmente por la lubricación del rodamiento. Se basa en la relación de viscosidad κ . Ella se define como la relación entre la viscosidad real del lubricante ν y la viscosidad ν_1 necesaria para una lubricación adecuada. La viscosidad necesaria para asegurar una lubricación adecuada a la temperatura de funcionamiento se puede obtener de los diagramas de los catálogos de fabricantes.

Como se considera una interdependencia entre los factores a_2 y a_3, la norma los ha combinado de la forma:

$$L_{na} = a_1 a_{23} L_{10}$$

siempre que las condiciones de limpieza sean favorables.
La figura **??** muestra un esquema básico de procedimiento presentado en la literatura especializada [**??**] haciendo uso de varios gráficos y valores tabulados, a los cuales se hace referencia en el diagrama. Este gráfico se divide en tres zonas: I, II y III. La razón de viscosidades $\kappa = \nu = \nu_1$ en la abcisa es una estimación del espesor de la película de lubricante. ν es la viscosidad del lubricante a ,a temperatura de operación y ν_1 se determina a partir del gráfico mostrado en la figura 5.2. En el caso de lubricación por grasa, es la viscosidad del aceite base.

Zona I

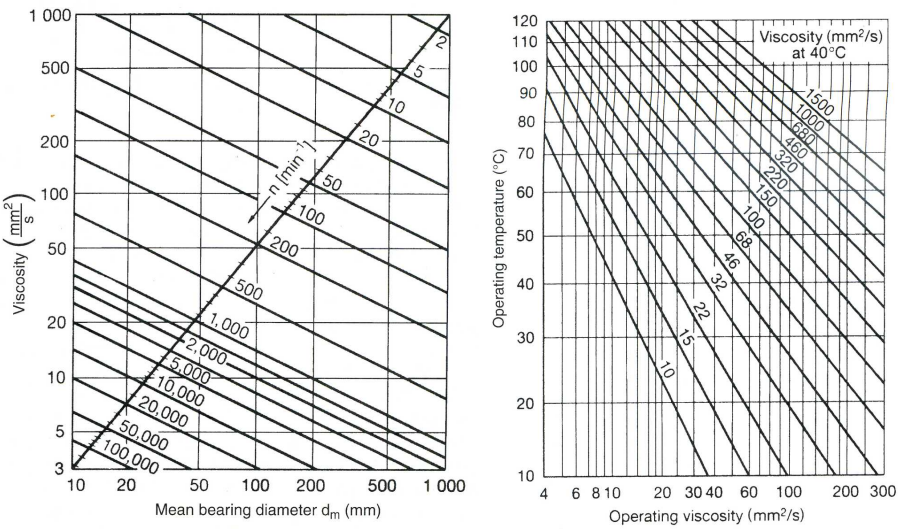


Figura 5.2: Viscosidades ν_1 requeridas en la lubricación de rodamientos

Failure probability (%)	Fatigue life	Factor a_1
10	L_{10}	1
5	L_5	0.62
4	L_4	0.53
3	L_3	0.44
2	L_2	0.33
1	L_1	0.21

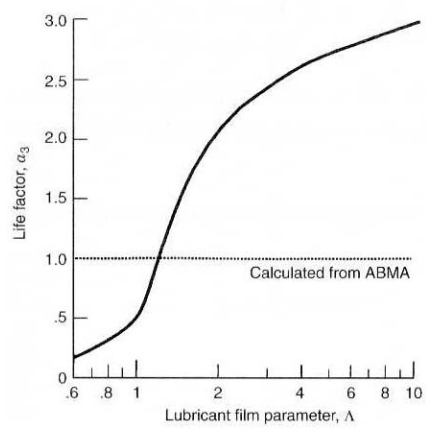


Figura 5.3: Factores a_1 y a_3

Zona que representa una muy buena limpieza. ($\kappa > 0{,}4$) y cargas no muy altas. El factor de limpieza V se le asociaa a las condiciones de limpieza según codificación ISO. Por ejemplo buenas condiciones de limpieza se le asocia el factor 0,5 o mayor. Para buenas condiciones de limpieza, el valor de $a_{23II^s} = a_{23}$ en función del factor f_s y κ.

Zona II

Con buen estándart de limpieza ($V = 1$, $s = 1$ y $a_{23} = a_{23II}$. La razón se puede explicar en función de la tabla 5.7. $f_s = C_0/P_0$ es una medida de la máxima presión Hertziana en el contacto donde ocurre la rodadura. C_0 es la carga estática del rodamiento, P_0 es la carga equivalente en función de los parámetros del rodamiento: $P_0 = X_0F_r + Y_0F_a$ en función de sus componentes radial F_r y axial F_a.

Zona III

Para condiciones de lubricación desfavorable desde el punto de vista de la contaminación $V = 2$ y $V = 3$.

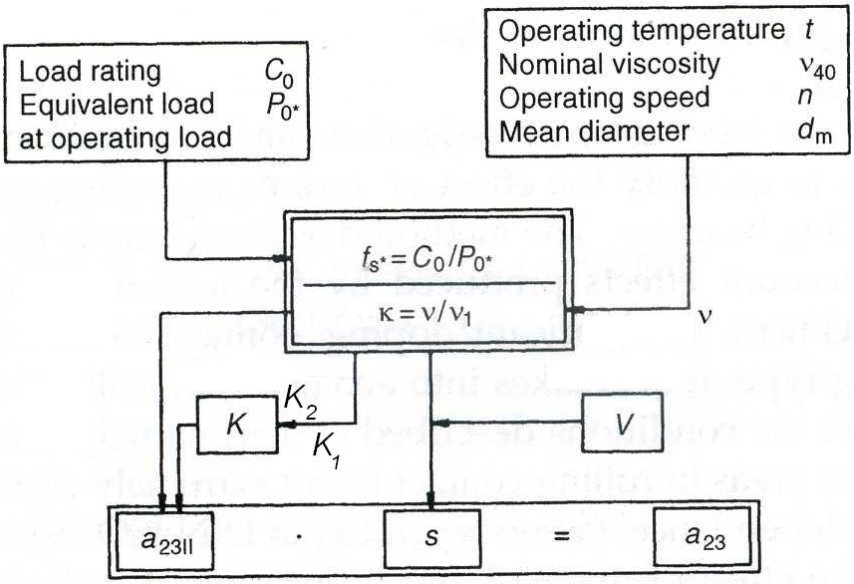


Figura 5.4: Esquema de procedimiento para determinar el factor de vida a_{23} en la vida ajustada de un rodamiento según DIN ISO 281

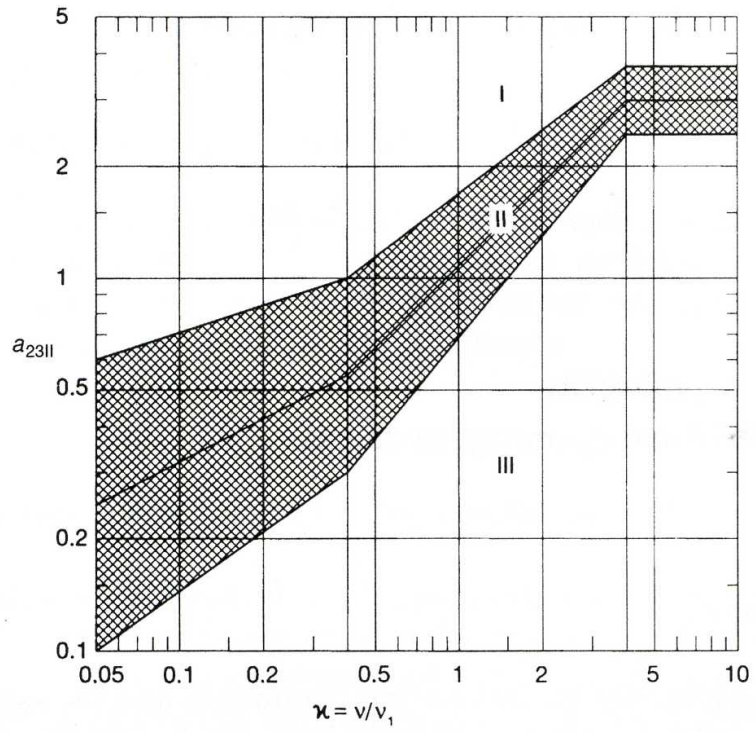


Figura 5.5: Factor a_{23} de vida

	$f_s^* \geq 8$	$8 > f_s^* \geq 4$	$f_s^* < 4$	Value
	Bearing type			
Tapered roller bearings	0	0	0	
Cylindrical roller bearings				
Spherical roller bearings				K_1
Spherical roller thrust bearings[c]	1	2	3	
Cylindrical roller thrust bearings[a,c]				
Full-complement cylindrical roller bearings[a,b]				
	Lubricant			
Suitable EP additives[d]	1	2	3	
Without additives $\nu/\nu_1 \geq 0.4$	2	4	6	K_2
Without additives $\nu/\nu_1 < 0.4$	7	>7	>7	

Value $K = K_1 + K_2$	Zone determining a_{23II}
$K \leq 2$	a_{23II}: upper curve of zone II
$K = 3$–4	a_{23II}: centre of zone II
$K = 5$–6	a_{23II}: lower curve of zone II
$K \geq 7$	a_{23II}: zone III; operating conditions should be improved

[a] K_1 can only be reached with fine filtration, otherwise assume $K_1 \geq 6$.
[b] Observe this for determining ν. The friction is at least 50% higher than in bearings with a cage, which produces a higher bearing temperature.
[c] Observe minimum load
[d] By selecting suitable additives that give wear protection for a specific application, together with help from the bearing manufacturer, $K_2 = 0$ can be assumed for all three load steps.

Figura 5.6: Estimación factores K_1 y K_2

$(D-d)/2$ (mm)	V[b]	Point contact: Oil cleanliness class according to ISO 4406	Point contact: Filtration ratio according to ISO 4572	Point contact: Maximum size of cycled particles (μm)[b]	Line contact: Oil cleanliness class according to ISO 4406	Line contact: Filtration ratio according to ISO 4572	Line contact: Maximum size of cycled particles (μm)[b]
	0.3	11/8	$\beta_3 \geq 200$	10	12/9	$\beta_3 \geq 200$	20
	0.5	12/9	$\beta_3 \geq 200$		13/10	$\beta_3 \geq 75$	
≤ 12.5	1	14/11	$\beta_6 \geq 75$	30	15/12	$\beta_6 \geq 75$	60
	2	15/12	$\beta_6 \geq 75$		16/13	$\beta_{12} \geq 75$	
	3	16/13	$\beta_{12} \geq 75$	100	17/14	$\beta_{25} \geq 75$	150
	0.3	12/9	$\beta_3 \geq 200$	15	13/10	$\beta_3 \geq 75$	25
	0.5	13/10	$\beta_3 \geq 75$		14/11	$\beta_6 \geq 75$	
>12.5 to 20	1	15/12	$\beta_6 \geq 75$	45	16/13	$\beta_{12} \geq 75$	75
	2	16/13	$\beta_{12} \geq 75$		17/14	$\beta_{25} \geq 75$	
	3	18/14	$\beta_{25} \geq 75$	150	19/15	$\beta_{25} \geq 75$	250
	0.3	13/10	$\beta_3 \geq 75$	25	14/11	$\beta_6 \geq 75$	40
	0.5	14/11	$\beta_6 \geq 75$		15/12	$\beta_6 \geq 75$	
>20 to 35	1	16/13	$\beta_{12} \geq 75$	75	17/14	$\beta_{12} \geq 75$	120
	2	17/14	$\beta_{25} \geq 75$		18/15	$\beta_{25} \geq 75$	
	3	19/15	$\beta_{25} \geq 75$	250	20/16	$\beta_{25} \geq 75$	350
	0.3	14/11	$\beta_6 \geq 75$	40	14/11	$\beta_6 \geq 75$	75
	0.5	15/12	$\beta_6 \geq 75$		15/12	$\beta_{12} \geq 75$	
>35	1	17/14	$\beta_{12} \geq 75$	120	18/14	$\beta_{25} \geq 75$	200
	2	18/15	$\beta_{25} \geq 75$		19/16	$\beta_{25} \geq 75$	
	3	20/16	$\beta_{25} \geq 75$	250	21/17	$\beta_{25} \geq 75$	350

[a] The following cleanliness scale applies: $V = 0.3$ utmost cleanliness, $V = 0.5$ very good cleanliness, $V = 1$ good cleanliness, $V = 2$ reduced cleanliness, $V = 3$ contaminated lubricant.
[b] Particles must not be harder than 50 HRC.

Figura 5.7: Evaluación factor V

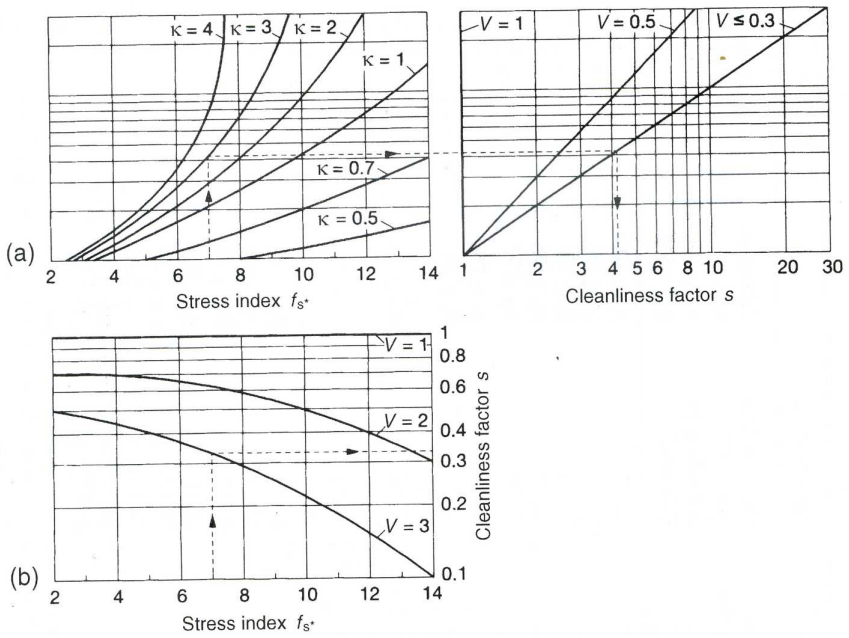


Figura 5.8: Factor de limpieza

La SKF ofrece su propia fórmula de vida útil ajustada, utilizando para ello el factor a_{SKF}, dada por la relación:

$$L_{10ha} = a_1 a_{SKF} L_{10h}$$

donde el factor $aSKF$ se encuentra en el catálogo según el tipod e rodamiento. Para rodamientos de bolas, la gráfica se muestra en la figura 5.9.

5.2. Lubricación

La lubricación correcta de un rodamiento está basada en condiciones elastohidrodinámicas (EHL) ya que por la configuración del tipo de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura se dificulta la formación de una película hidrodinámica pura.

La lubricación EHL para los rodamientos depende de la velocidad, la carga, la viscosidad del aceite, el método de lubricación y la temperatura de operación. El espesor de la película lubricante se incrementa al aumentar la

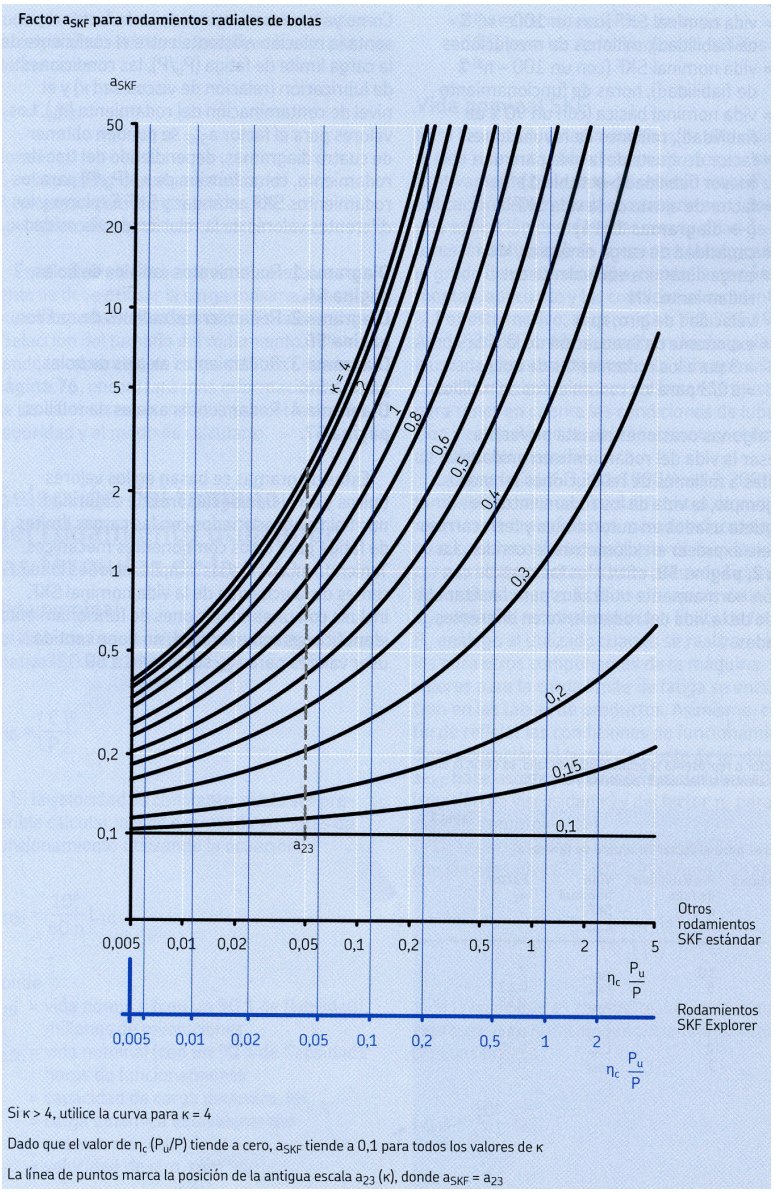


Figura 5.9: Factor a_{SKF} de vida para rodamientos SKF de bolas. Para rodillos existen otros gráficos semejantes

carga o la temperatura de operación.

Al entrar el lubricante en la zona de carga del rodamiento, la película lubricante trata de romperse, pero si la viscosidad del lubricante a sido seleccionada adecuadamente, desarrolla una presión hidráulica que separa las superficies y las deforma elásticamente sin que se presente el contacto metal.

Las elevadísimas presiones unitarias que soportan los rodamientos tienden a aplastar las superficies de las esferas o rodillos tan pronto empiezan a girar bajo carga sobre sus caminos de rodadura. Así, el tamaño de las esferas o rodillos es un poco menor al tamaño que tenían originalmente y por otra parte, estas mismas presiones causan una depresión en las pistas, por lo que las áreas de las superficies bajo compresión son ligeramente mayores.

Este aplastamiento y depresión simultáneo de las superficies de contacto permite cierto deslizamiento de los elementos entre sus respectivas áreas de contacto. Este tipo de deslizamiento ocurre en todos los tipos de rodamientos.

5.2.1. Velocidad de operación

Velocidades de operación muy bajas generan un espesor de película lubricante EHL inadecuado y las altas velocidades pueden ocasionar una distribución anormal de la carga sobre los elementos rodantes, haciendo que se concentre más sobre un elemento y por otro lado, la fuerza centrífuga puede llegar a expulsar el lubricante de la zona de contacto, dando lugar a una lubricación ineficiente.

Estos problemas ocurren solamente a velocidades muy altas, como en el caso de turbinas a gas en aviación. Por ello los fabricantes de rodamientos recomiendan límites de velocidad para cada tipo de rodamiento, basados en un factor de velocidad nd_m, donde n es la velocidad del rodamiento en rpm, $d_m = (D + d)/2$ es el diámetro medio con D el diámetro exterior y d el diámetro interior en mm. La Tabla mostrada en la figura 5.10 especifica factores máximos de velocidad para rodamientos lubricados con aceite o con grasa.

Los números límites de revoluciones n_g indicados en las tablas de los catálogos de rodamientos separadamente para lubricación con grasa y lubricación por aceite, tienen validez para la ejecución estandart del rodamiento,

Tipo de rodamiento	Grasa	Aceite
Rígido de bolas	340.000	500.000
De rodillos cilíndricos	300.000	500.000
De bolas y de rodillos a rótula	145.000	290.000
Axiales de bolas y de rodillos	140.000	280.000
La velocidad de un rodamiento se puede clasificar dentro de los siguientes rangos: Baja < 50 rpm Media de 50 a 500 rpm Alta > 500 rpm		

Figura 5.10: Límite máximo del factor de velocidad para lubricar rodamientos con grasa o con aceite

es decir, cuando los rodamientos radiales están sometidos a cargas puramente radiales y los rodamientos axiales están sometidos a pura carga axial. El número límite de revoluciones se determina de la siguiente ecuación:

$$n_g = f_0 n$$

Donde el factor de disminución de la velocidad de giro f_0 se determina de la figura 5.11 conociendo la relación entre la fuerza axial y radial F_a/F_r y el tipo de rodamiento.

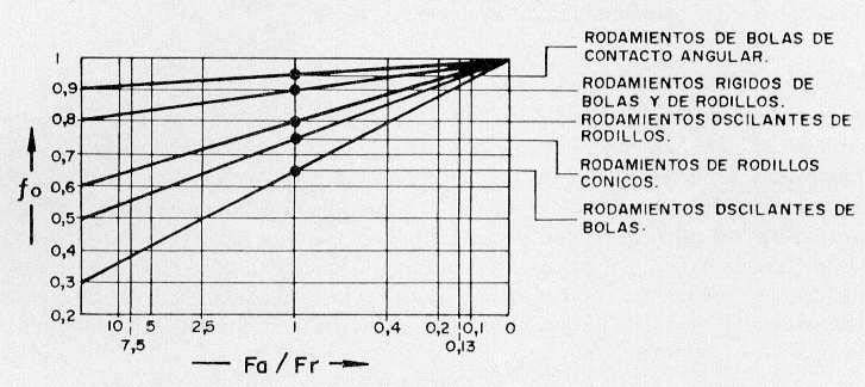


Figura 5.11: Factor de disminución de la velocidad de giro f_0

5.2.2. Carga

Bajo condiciones EHL, el efecto de la carga sobre el espesor de la película lubricante no es tan grande como el de la velocidad o viscosidad del aceite. Por ejemplo, mientras al duplicar la velocidad o la viscosidad del aceite se puede obtener hasta un 50 % de incremento en el espesor de la película de lubricante, al duplicar la carga solamente se reduce en un 10 % el espesor de dicha película. Por lo tanto cuando se selecciona el aceite o la grasa para un rodamiento, se hace de acuerdo con el factor de velocidad y la temperatura de operación, sin tener en cuenta la carga que actúe sobre él.

Respecto a la carga equivalente P, los catálogos la clasifican según:

$$P = XF_r + YF_a$$

Los vaslores de X e Y los entrega el fabricante según el tipo de rodamiento usadoy F_r y F_a son las componentes radial y axial en el descanso.

El problema se presenta cuando sobre el rodamiento actúan cargas variables. Una buena aproximación entregada por la literatura especializada se muestra en la figura 5.12.

La presión entre la jaula y los elementos rodantes no es lo suficientemente alta como para que se presenten en este punto condiciones de lubricación EHL, por lo tanto, el desgaste de estos elementos se puede reducir sólo si se garantiza que el lubricante penetra en la cantidad suficiente entre las tolerancias de la jaula y de los elementos rodantes. La carga P equivalente que actúa sobre un rodamiento se puede clasificar dentro de las siguientes categorías, teniendo en cuenta la capacidad de carga dinámica C. (ver Tabla de la figura 5.1)

Cuadro 5.1: Clasificación de la carga P que actúa sobre un rodamiento

Carga	Rodamientos	
	Bolas	Rodillos
ligera	Hasta 0.07C	Hasta 0.08C
Normal	Myor a 0.07C	Mayor a 0.08C
	Hasta 0.15C	Hasta 0.18C
Alta	Mayor a 0.15C	Mayor a 0.18C
Extremadamente alta	Mayor a 0.25C	Mayor a 0.30C

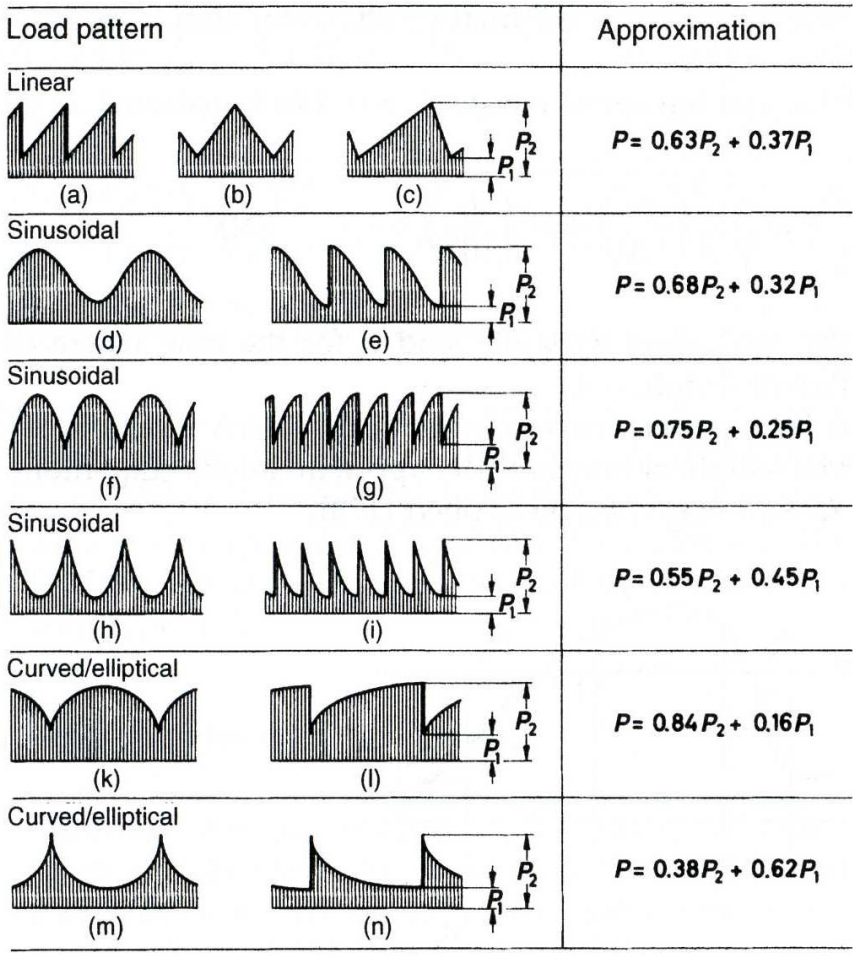


Figura 5.12: Aproximación de la carga equivalente en un rodamiento expuesto a modelos de cargas variables

Cuando el rodamiento está sometido a cargas de impacto o a vibraciones, generalmente se requieren espesores de película lubricante mayores, lo que hace necesario el empleo de aceites más viscosos. La carga al actuar sobre el rodamiento tiene un comportamiento que puede ser normal o anormal, dando lugar a que el rodamiento alcance su vida a la fatiga o que esta se vea progresiva o bruscamente interrumpida por alguno de los diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir. En la figura 5.13 se especifican las diferentes características de las cargas que pueden actuar sobre un rodamiento de bolas.

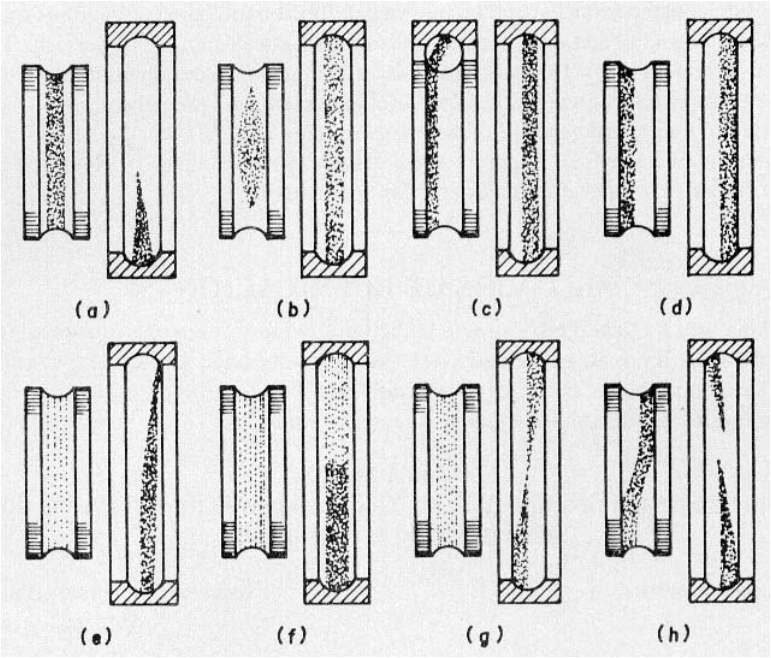


Figura 5.13: Aplicación de carga radial. (a) girando el anillo interior, (b) girando el anillo exterior. Aplicación de carga axial (c)normal, (d) excesiva, (e) carga radial y axial, (f) precargado radial, (g) desalineamiento anillo exterior, (h) desalineamiento anillo interior

5.2.3. Temperatura

Los aros de los rodamientos y los cuerpos rodantes son fabricados de acero al cromo templado y endurecidos y revenidos hasta obtener los valores estandarizados. Con esta dureza los rodamientos logran las capacidades de

carga indicadas para una temperatura de servicio constante de hasta 120°C y temperaturas punta de hasta 500°C.

A temperaturas más altas se modifica la estructura del material y aparecen pérdidas de la dureza y variaciones en las medidas. Mediante un tratamiento térmico especial de los aros del rodamiento se pueden compensar las variaciones en las medidas. Para distinguir estos aros con estabilización de las medidas de los aros normales, se proveen con un símbolo adicional (ver Tabla de figura 5.14).

Símbolo adicional	Temperatura de servicio °C	Factor de temperatura f_t
S0	150	1.00
S1	200	0.90
S2	250	0.75
S3	300	0.60

Figura 5.14: Símbolo adicional y factor de temperatura de servicio

El tratamiento térmico especial produce pérdida de dureza y en consecuencia una disminución de la capacidad de carga dinámica C, la que se considera mediante el factor de temperatura f_t. Las temperaturas de servicio elevadas también requieren exigencias más elevadas en la resistencia térmica del lubricante.

La grasa no se debe salir del rodamiento y la viscosidad del aceite no debe ser inferior a 12 cSt (2°E) a la temperatura de trabajo. En el caso de lubricación con grasa, este límite se refiere al aceite base. La temperatura de servicio del rodamiento está influenciada por los siguientes factores:

- Calentamiento propio,
- Calentamiento exterior a través del eje, de la caja o por radiación,
- Superficie de refrigeración de la caja,
- Efecto refrigerante del eje,
- Efecto de ventilación de las partes vecinas,

- Temperatura de la atmósfera circundante,
- Tipo y cantidad de lubricante.

Debido a esta gran cantidad de influencia es difícil hacer una estimación de la verdadera temperatura en un caso determinado. Por esto sólo por la observación de máquinas de construcción semejante, que ya han funcionando bajo condiciones similares, se puede estimar el orden de magnitud de la temperatura probable de servicio.

Lo más fácil es la estimación de la temperatura cuando se tiene un calentamiento exterior alto. La tabla 14.6 entregan algunos valore s de incrementos de temperatura dependiendo del tipo de máquina donde funciona el rodamiento.

5.3. Métodos de Lubricación

Los métodos más utilizados se pueden clasificar como:

1. Lubricación por salpique
2. Lubricación por inmersión o baño
3. Lubricación por goteo y por mecha
4. Lubricación por niebla
5. Lubricación por cono de elevación (ejes verticales)
6. Lubricación por anillo
7. Lubricación por circulación de aeite
8. Lubricación por grasera.

5.3.1. Lubricación por grasa

De los tipos de lubricación usados en rodamientos, entre los principales se encuentra la Lubricación por grasa. Se dice que entre un 80 y 90 % de los rodamientos se lubrica con grasa. En el caso de los reductores existe una preponderancia de usar aceites que permitan lubricar adecuadamente los engranajes y los rodamientos, por lo que por lo general se usan sistemas asociados a aceites lubricantes.

Un gran número de rodamientos se lubrican con grasa debido a que permiten mayores frecuencias entre relubricaciones y menores costos por consumo de lubricante. Por lo general se emplea la grasa cuando se presentan uno o varios de los siguientes factores:

- Un medio ambiente bastante contaminado y se requiere buena estanqueidad
- Altas o bajas temperaturas de funcionamiento
- Que el factor de velocidad esté dentro del rango establecido para cada tipo de rodamiento (Tabla 8)
- Que se requieran prolongadas frecuencias entre relubricaciones

Para que cumpla adecuadamente con sus funciones, debe tener las siguientes propiedades:

- Consistencia requerida
- Buenas propiedades anticorrosivas y antiherrumbe
- Buena resistencia a la oxidación,
- Punto de goteo adecuado
- Factor de velocidad mayor que el del rodamiento,
- Estabilidad mecánica,
- Buenas propiedades antidesgaste (o de EP si se requieren),
- Viscosidad adecuada del aceite base.

En el caso de lubricación por grasa, para evitar un engrase excesivo del rodamiento cuando la cavidad o el soporte no tiene tapón, es necesario dosificar la cantidad de grasa durante el reengrase. Un engrase excesivo puede producir sobrecalentamiento adicional sobre el descanso, acelerando la pérdida de vida útil de la grasa y pro ende del rodamiento. La cantidad de grasa requerida se obtiene de la expresión:

$$C_g = XDB \quad (gr)$$

Esta cantidad C_g es la que se debe aplicar entre los elementos rodantes y caminos de rodadura.D es el diámetro exterior del rodamiento en mm y

X	Periodo de relubricación
0.001	Diario
0.002	Semanal
0.003	Mensual
0.004	Anual
0.005	Cada 2 a 3 años

Figura 5.15: Factor X de reengrase que depende de la frecuencia de relubricación (adimensional)

B es el ancho. Para ello es necesario averiguar a cuantos gramos equivale un pistoletazo y de esta manera determinar el número de veces que el encargado de la lubricación debe accionarla.

La pistola engrasadora debe estar en buen estado, de lo contrario, la cantidad aplicada será muy imprecisa.

5.3.2. Frecuencia de lubricación

En la mayoría de las aplicaciones de rodamientos hay que completar o renovar la grasa en determinados intervalos de tiempo. La frecuencia depende del consumo de grasa por el rozamiento del rodamiento, en función de sus diámetros, revoluciones y temperaturas.

En en la figura 5.16 se indican los plazos de reengrase T en horas que pueden alcanzarse en condiciones de ambiente favorables para los diversos tipos de rodamientos en función de la razón n/n_g, donde n es la velocidad de giro del rodamiento y n_g es la velocidad máxima a la cual puede girar (catálogo del fabricante), ambos en RPM.

Si las condiciones de servicio y de ambiente son desfavorables, se deben reducir los plazos de reengrase T, por ejemplo si la grasa está solicitada por temperaturas algo mayores o por fuertes vibraciones, o si su capacidad lubricante está condicionada por polvo o humedad. El plazo de reengrase aconsejable T_N, bajo condiciones de servicio desfavorables se obtiene a partir de:

$$T_N = qT$$

El factor de reducción q se compone de tres factores: f_1 para caracterizar la influencia de polvo y humedad; f_2 para definir la influencia de golpes vi-

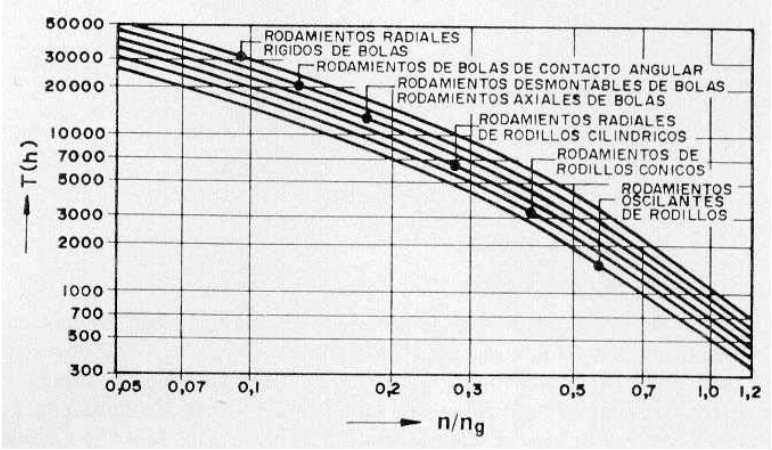


Figura 5.16: Plazo de reengrase T para rodamientos lubricados con grasa, bajo condiciones de ambiente favorables ($q = 1$)

braciones y oscilaciones y f_3 para caracterizar la influencia de temperaturas más elevadas:

$$q = f_1 f_2 f_3$$

Condiciones de servicio	Características	Factor de reducción		
		f_1	f_2	f_3
Polvo y humedad	Escasa	0.7 - 0.9		
	Fuerte		0.4 - 0.7	
	Muy fuerte			0.1 - 0.4
Golpes, vibraciones y oscilaciones	Reducidas	0.7 - 0.9		
	Fuertes		0.4 - 0.7	
	Muy fuertes			0.1 - 0.4
temperatura	< a 75°C	0.7 - 0.9		
	75°C a 85°C		0.4 - 0.7	
	85°C a 120°C			0.1 - 0.4

Figura 5.17: Factores de reducción de periodo de reengrase

En la tabla 5.2 se indica una serie de aplicaciones a rodamientos con su respectivo factor q. De acuerdo a la cantidad de puntos se puede ver en que grado influye cada magnitud.

Las normas proponen soluciones basadas en fórmulas del tipo:

$$t_f = k(\frac{14x10^6}{n\sqrt{d}} - 4d) \tag{5.1}$$

Cuadro 5.2: Factor de reducción q de la frecuencia de reengrase para condiciones desfavorables de trabajo
OBSERVACIONES:
•: influencias escasas
••: infl. considerables
• • •: infl. muy considerables

Aplicación de rodamientos	Polvo humedad	Golpes vibraciones oscilaciones	Temperat. elevada	Factor de reducción q
Motor eléctrico estacionario	-	-	-	1
Punto móvil de un torno	-	-	-	1
Husillo de una rectificadora	-	-	-	1
Rectificadora plana	-	-	-	1
Eje de sierra circular	•	-	-	0.8
Volante de una prensa para	•	-	-	0.8
carrocerías Molino de martillos	•	-	-	0.8
Freno dinamométrico	-	-	•	0.7
Caja grasa locomotora	•	•	-	0.6
Poleas de transmisión de un teleférico	••	-	-	0.6
Rueda delantera automóvil	•	•	-	0.6
Husillo de máquina textil	-	• • •	-	0.3
Machacadora mandíbulas	••	••	-	0.2
Motor vibratorio	•	••	-	0.2
Cilindro aspirados	• • •	••	-	0.2
Cilindro de prensado húmedo	• • •	-	-	0.2
Cilindro de trabajo de un laminador	• • •	-	-	0.2
Rueda de canguilones de excavadora	• • •	-	-	0.1
Sierra de doble bastidor	•	• • •	-	0.1
Apisonadora vibratoria	•	• • •	• • •	0.1
Cribadora oscilante	•	• • •	-	0.1

donde: t_f es el intervalo de relubricación de grasa en horas, k es un factor que depende del tipo de rodamiento: $k = 1$ para rodillos esféricos, $k = 5$ para rodillos cilíndricos y $k = 10$ para rodamientos radiales de bolas; n es la velocidad de rotación (rpm); d es el diámetro del eje (aro interior).

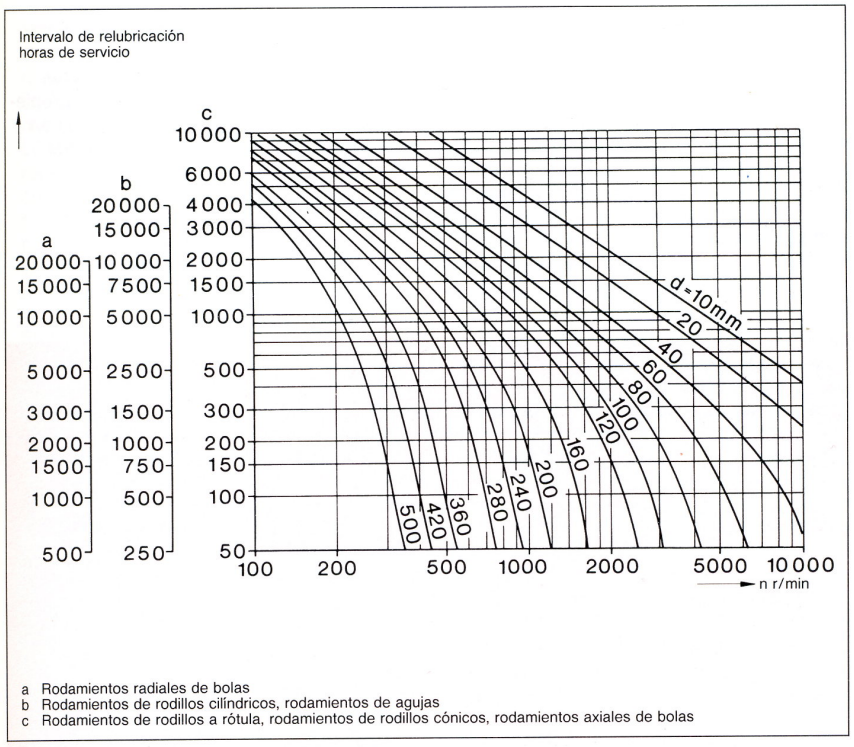


Figura 5.18: Forma gráfica de representar la ecuación 5.1

5.3.3. Tipos de grasa

Las grasas más utilizadas en la lubricación de rodamientos son las de jabón de sodio, de calcio y de litio.

- Sodio. Son solubles en agua, favorecen las superficies metálicas de la corrosión, apropiadas para rodamientos que giran a altas velocidades, debido a su elevada al batido. Se recomiendan igualmente para altas temperaturas de funcionamiento.

- Calcio. No son solubles en agua, a temperaturas cercanas a las del

punto de ebullición del agua se separan. No se deben emplear para elevadas velocidades de funcionamiento.

- Litio. Se utilizan ampliamente y reciben el nombre de multipropósito o de uso múltiple, debido a que presentan buena resistencia a las altas temperaturas y a una adecuada protección contra la humedad y el agua, reemplazan las de calcio y las de sodio.

Las únicas grasas que son compatibles y que se pueden mezclar son las de calcio y de litio; las demás son incompatibles.

5.3.4. Selección de la grasa

Para seleccionar adecuadamente el tipo de grasa, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

(A) n/n_g, adimensional.

En este caso, n_g es la velocidad máxima en rpm a la cual puede girar el rodamiento cuando se lubrica con grasa. Este dato se toma del catálogo del fabricante del rodamiento.

(B) Magnitud de carga especifica. P/C, adimensional. Donde:

P : Es la carga equivalente o resultante aplicada sobre el rodamiento; está constituida por una carga radial F_r y una axial F_a; y se calcula de la siguiente ecuación:

$$P = VXFr + YFa, \quad kgf$$

F_r : Carga radial que actúa sobre el rodamiento, kgf.

F_a : Carga axial que actúa sobre el rodamiento, kgf.

X, Y: Factores de carga radial y axial respectivamcnte, se determinan de tablas, conociendo la relaci6n F_a/C_o.

V : Factor de rotación de la carga. Se determina de: $V = 1$: para carga rotativa en el aro interior (es el que gira) y $V = 1{,}2$ para carga rotativa en el aro exterior (es el que gira).

Si la relación $F_a/VF_r < e$, la carga equivalente se calcula de la siguiente ecuación:

$$P = VFr, kgf$$

e ; factor de límite de validez de X e Y. (Es función del ángulo de contacto del rodamiento), se determina de tabla 14, conociendo la relación F_a/C_o.

C_o : Capacidad de carga estática, kgf. Se determina del catálogo del fabricante del rodamiento.

Factor	Valor								
F_a/C_o	0,014	0,028	0,056	0,084	0,11	0,17	0,28	0,42	0,55
X	0,56	0,560	0,560	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Y	2,30	1,990	1,710	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00
e	0,19	0,220	0,260	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44

Figura 5.19: Factores de carga radial (X) , axial (Y) y del limite de validez (e)

C : Magnitud de la capacidad de carga dinámica del rodamiento, kgf. Se determina del catálogo del fabricante del rodamiento.

f : Fracción de rozamiento por deslizamiento, según el tipo de rodamiento, adimensional. Este parámetro se determina de: $f(P/C)$, donde $f = 1$: Para rodamientos de bolas, independientemente de la carga y para rodamientos de rodillos cargados, preferentemente en sentido radial. $F_a/F_r \leq 1$

$f = 2$: Para rodamientos de rodillos cargados, preferentemente en sentido axial, $F_a/F_r > 1$

Con la magnitud de carga específica y la fracción de rozamiento por deslizamiento conocidas, se determina el factor $f(P/C)$. Con $f(P/C)$ y n/n_g se determinan de la figura 25 las condiciones de trabajo de la grasa.

Según lo mostrado en la figura 5.20 se distinguen tres sectores:

1. Sector I. Grasa para rodamientos de uso normal; cerca de la línea límite oblicua pueden aparecer temperaturas más elevadas y es necesario emplear grasas tecnicamente más estables.

2. Sector II. Grasas con aditivos EP. Para rodamientos sometidos a cargas elevadas, de impacto, de choque o a vibraciones, se emplea un aceite base de mayor viscosidad.

3. Sector III. Grasa para rodamientos que giran a altas velocidades y sometidos a bajas cargas.

Una vez definida el area de trabajo de la grasa se va a la tabla 15. Las grasas que más se utilizan en lubricación de rodamientos son la NLGI 1, 2 y 3. La NLGI 4 es poco frecuente.

En el campo I se indican aplicaciones de rodamientos que con valores de $P/C \leq 0,15$ y $n/n_g \leq 1$ están relativamente poco solicitadas. Aquí la clase de grasa está determinada por las condiciones de servicio y ambiente. El hecho de que se usen principalmente grasas líticas depende, como se indica

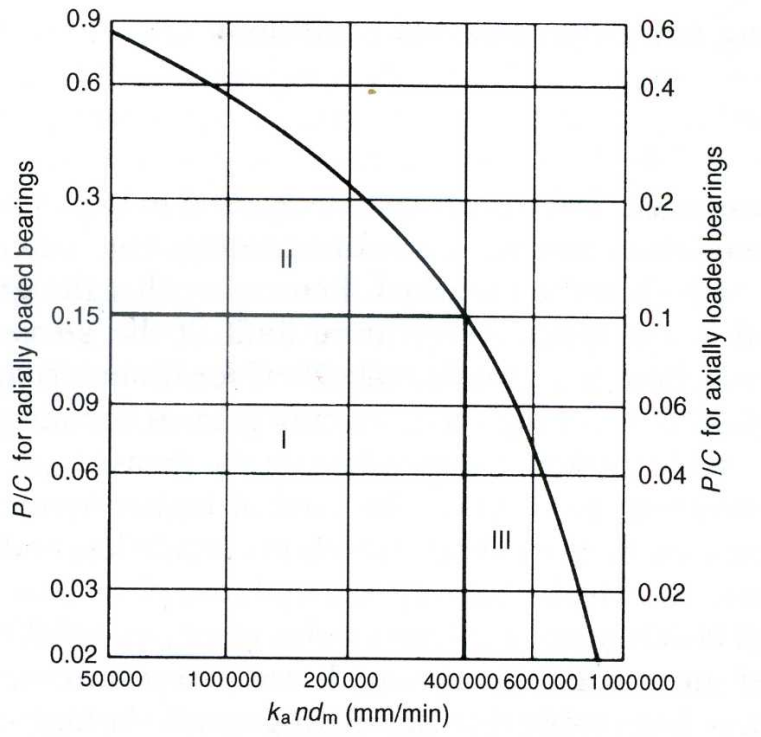


Figura 5.20: Selección de grasa. $k_a = 1$ para rod. de bolas. $k_a = 2$ para rodillos esféricos y $k_a = 2$ para axiales

arriba, de la tendencia actual de conseguir una lubricación contínua.

En el campo II se indican aplicaciones de rodamientos que han de absorber cargas más elevadas, con $P/C > 0{,}15$, y en las que son necesarias grasas con aditivos EP o grasas especiales. Finalmente, el campo III abarca aplicaciones de rodamientos que giran con elevado número de revoluciones y que han de ser lubricados, por lo tanto, con grasas especiales.

5.3.5. Lubricación por aceite

Un rodamiento se lubrica con aceite cuando se presentan las siguientes condiciones:

- Elevadas temperaturas de funcionamiento y se necesite un buen efecto refrigerante. En este caso, la mayor parte del aceite se utiliza para la evacuación del calor,
- Se requiera evacuar contaminantes,
- El factor de velocidad esté dentro de los límites establecidos para cada tipo de rodamiento (Ver figura 5.10)

Sin embargo, a pesar de las ventajas que tiene lubricar los rodamientos con aceite, es más difícil garantizar una adecuada estanqueidad de la cavidad donde van montados.

5.3.6. Características del aceite

Para que un aceite cumpla adecuadamente con sus funciones, debe tener las siguientes características:

- Viscosidad correcta
- Adecuado índice de viscosidad
- Buena resistencia a la oxidación
- Buenas propiedades anticorrosivas y antiherrumbe
- Buenas propiedades antiemulsionantes
- Buenas propiedades antidesgaste (y de EP si se requiere)

Otras propiedades como punto de inflamación, punto de fluidez, número de neutralización, y residuos de carbón Conradson, son importantes para aplicaciones más específicas.

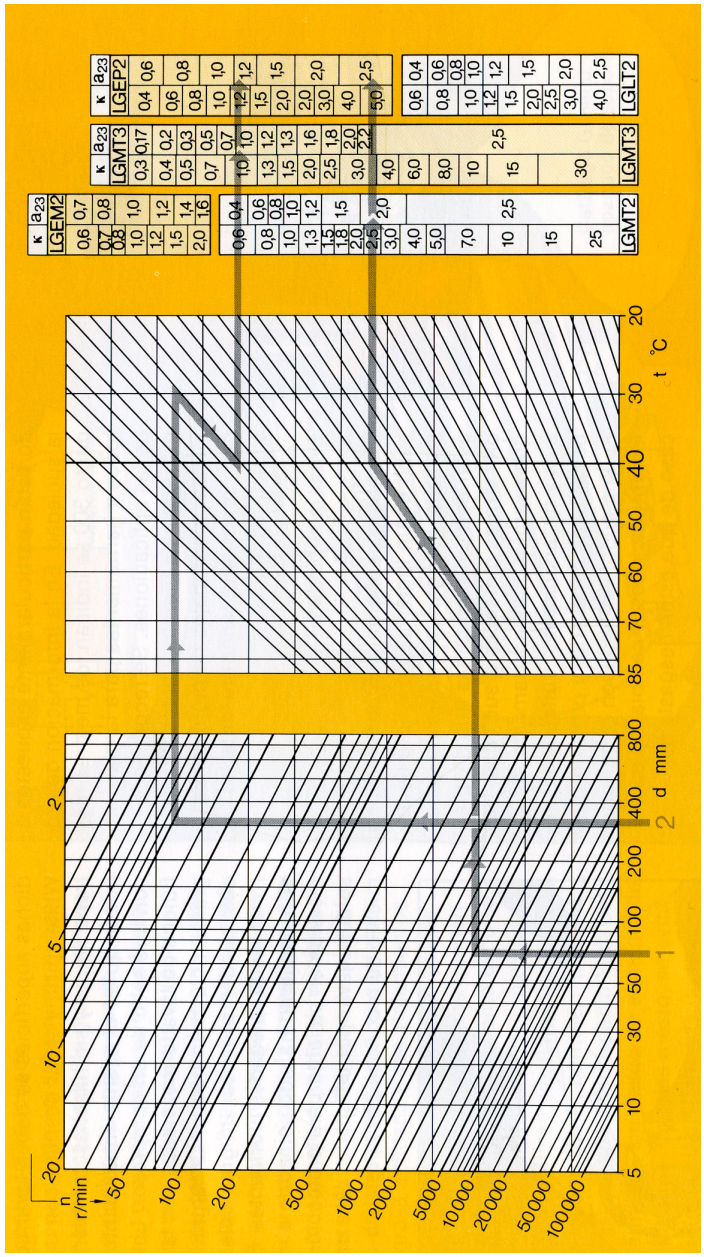


Figura 5.21: Selección de grasa según SKF

Campo	Máquina y lugar de aplicación	Factor f	Relación de cargas $f\frac{P}{C}$	Relación de velocidades de giro $\frac{n}{n_g}$	Temperatura máxima del rodamiento °C	Condiciones de giro exigidas: Rozamiento escaso	Condiciones de giro exigidas: Marcha silenciosa	Condiciones de servicio: Situación del eje	Condiciones de servicio: Reengrase
I	Instalación de banda transportadora Rodillo de transportador	1	0,05	<0,5	50°	–	–	Horizontal hasta oblicuo	de 2 a 3 meses
	Motor eléctrico Motores eléctricos de serie 1...20 kW	1	0,05	0,5...0,6	70°	–	–	Horizontal hasta vertical	Lubricación continua
	Motores eléctricos de tracción	1	0,1	1	90°	–	–	Horizontal	desp. de 300.000 km como máximo
	Motores eléctricos <500W	1	<0,05	<1	50°	sí	–	Horizontal hasta vertical	Lubricación continua
	Motor eléctrico para aparatos domésticos	1	<0,05	<1	50°	–	sí	Horizontal hasta vertical	Lubricación continua
	Motor eléctrico para instalaciones de secado	1	0,05	<0,5	–	–	–	Horizontal	Lubricación continua
	Motor eléctrico para instalaciones de refrigeración	1	0,05	<0,5	–	–	–	Horizontal	Lubricación continua
II	Rodillo horno giratorio	2	0,6...0,9	0,01...0,02	–	–	–	Horizontal	de 3 a 6 meses
	Tren blooming dúo de laminación	1	0,45	0,1	–	–	–	Horizontal	3 días
	Apoyo de la cuba de un convertidor	1	0,65	<0,01	–	–	–	Horizontal	de 1 a 3 meses
	Bomba centrífuga	1	0,18	0,75	75°	–	–	Horizontal	de 1 a 2 meses
III	Fresadora de mesa	1	<0,1	<2	40°	–	–	Vertical	de 2 a 3 meses
	Husillo de rectificadora de interiores	1	<0,1	1,8...2,5	30°...45°	–	–	Horizontal	Lubricación continua
	Husillos para máquinas textiles	1	<0,1	2,5...3,0	50°	sí	sí	Vertical	Lubricación continua

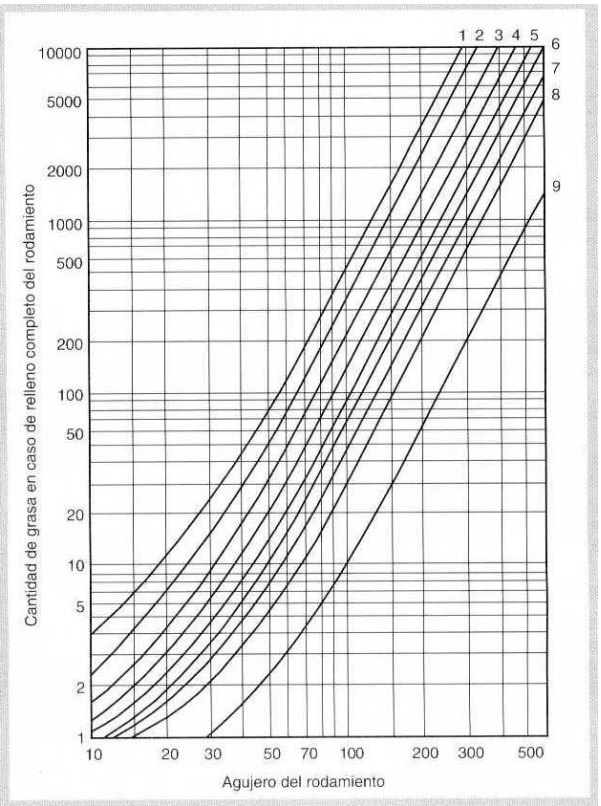
Nota. La viscosidad del aceite base de la grasa debe ser la misma que si el rodamiento se estuviera lubricando con aceite.

Figura 5.22: Selección de grasas para rodamientos

Condiciones del ambiente			Grasa lubricante				
Temperatura del rodamiento °C	Ensuciamiento	Corrosión	Base de saponificación	Consistencia	Temperatura de servicio °C	Aditivos	Observaciones
–	Polvo, barro	Agua de condensación y agua	Ca	2-3	-20... +60	Anti-oxidante	La duración de un rodillo de banda transportadora es de 5 años aproximadamente.
			Li	2-3	-20 +120	Anti-oxidante	
–	Polvo	Agua de condensación	Li	2	-20... +120	Anti-oxidante	Los rodamientos se sustituyen después de 4 a 8 años.
			Li	3	-20... +120	Anti-oxidante	Antes con grasa sódica, hoy debido a la lubricación continua con grasa lítica.
–	Polvo	Agua de salpicadura y de condensación	Li	3	-30... +120	Anti-oxidante	Grasa lítica para conseguir un período de reengrase largo a pesar de la solicitación elevada.
–	Polvo	–	Li	2	-50... +120	Aceite básico sintético	El motor tiene que arrancar con poca absorción de potencia.
–	Polvo	Humedad	Li	2	-15 +100	Anti-oxidente	Grasa especial filtrada con aceite básico de alta viscosidad para giro silencioso.
+130... +140	Polvo	Humedad, agua de condensación	Compleja de Na	3	-35... +150	–	Grasa para altas temperaturas.
-40...-30	–	Humedad, medios corrosivos	Li	2	-50... +120	Aceite básico sintético	Grasa para bajas temperaturas para que el rozamiento de arranque a bajas temperaturas sea escaso.
+60... +70	Polvo	Humedad	Li	2-3	-20... +120	Anti-oxidante Alta presión	Con la grasa de la clase de penetración 3, se obtiene un buen efecto obturador, incluso con períodos largos de reengrase.
+60	Cascarilla de laminación	Agua refrigeración	Compleja de Ca o Li	2	-25... +130	Anti-oxidante Alta presión	Grasa con aceite básico de alta viscosidad y aditivos EP.
+50... +80	Polvo, ceniza y óxido de hierro	Humedad	Li	2	-20... +120	Anti-oxidante y MoS_2	Con los aditivos de MoS_2, se obtiene aún una capa lubricante suficiente a velocidades de giro pequeñas.
–	–	Agua	Li	2	-20... +120	Anti-oxidante Alta presión	La carga elevada exige aditivos EP. El elevado número de revoluciones exige un reengrase frecuente.
–	Polvo	–	Compleja de bario	2	-60... +130	–	Relubricación con grasa nueva durante la revisión. A pesar de las temperaturas bajas reinantes, normalmente son necesarias grasas para temperaturas de servicio elevadas porque pequeñas alteraciones en la marcha originan un rápido crecimiento de la temperatura debido al elevado número de revoluciones. El desarrollo comenzó con grasas líticas, con aceite mineral básico, hasta llegar a grasas líticas con aceite básico sintético y grasas complejas que alargan el tiempo de aplicación debido a su elevado límite de temperaturas.
–	Polvo	Humedad	Li con aceite básico	2	-60... +130	–	
–	Polvo	Humedad	sintético	2	-60... +130	–	

Figura 5.23: Continuación.....Selección de grasas para rodamientos

Serie de rodamientos	Curva
Rodamiento radial rígido	
618 T jaula	8 – 9
618 M jaula	9
160	7
60	6
62	4
63	2 – 3
64	1
Rodamientos de bolas angulares	6
70	4
72B	2 – 3
73B	
Rodamientos de rodillos cónicos	3 – 4
302	2
303	2
313	6
320X	3 – 4
322	1 – 2
323	7 – 8
329	5
330	4
331	4
332	
Rodamientos de rodillos cilíndricos	7
NU10	5
NU2	4
NU22	2
NU23	3
NU3	2
NU4	5
NN30K	7
NNU49	
Rodamiento de rodillos a rótula	3
213	4
222	2
223	6
230	4
231	3 – 4
232	8
239	5
240	3
241	



Valores orientativos para la cantidad de relleno (densidad aprox. 0,95 g/cm³)

Figura 5.24: Selección de cantidad de grasa inicial para rodamientos

Clase NLGI DIN 51 818	Penetración trabajada DIN ISO 2137 (0,1 mm)	Estructura	Finalidad de uso general
000 00 0	445 ... 475 400 ... 430 355 ... 385	fluida casi fluida extrem. blanda	Preferentemente para la lubricación de engranajes
1 2 3	310 ... 340 265 ... 295 220 ... 250	muy blanda blanda media	Lubricación de rodamientos y cojinetes de deslizamiento
4 5 6	175 ... 205 130 ... 160 85 ... 115	sólida muy sólida extrem. sólida	Grasa hermetizante y de bloqueo para laberintos y griferías

Distribución de la consistencia de las grasas lubricantes en clases NLGI

Figura 5.25: Especificación de grasas para rodamientos (norma NLGI)

5.3.7. Viscosidad del aceite requerido

Se debe calcular correctamente debido a que viscosidades demasiado altas originan peligrosas elevaciones de temperatura y viscosidades demasiado bajas no permiten que se forme una película lubricante lo suficientemente gruesa como para impedir el contacto metálico entre los diferentes elementos del rodamiento.

La viscosidad del aceite a la temperatura de operación se calcula de la figura 5.31, conociendo la relación n/ng y el tipo de rodamiento. Con la viscosidad a la temperatura de funcionamiento se encuentra el grado ISO del lubricante.

Observaciones:

1. Se deben usar aditivos EP y la viscosidad se debe incrementar entre 1.5 y 2 veces el valor calculado cuando se presenten cargas de impacto, vibraciones o el rodamiento soporte una carga equivalente a 0.18 C.

2. El tipo de lubricante se debe seleccionar cuidadosamente cuando ala velocidad de operación esté por encima de 0.75 ng porque es posible

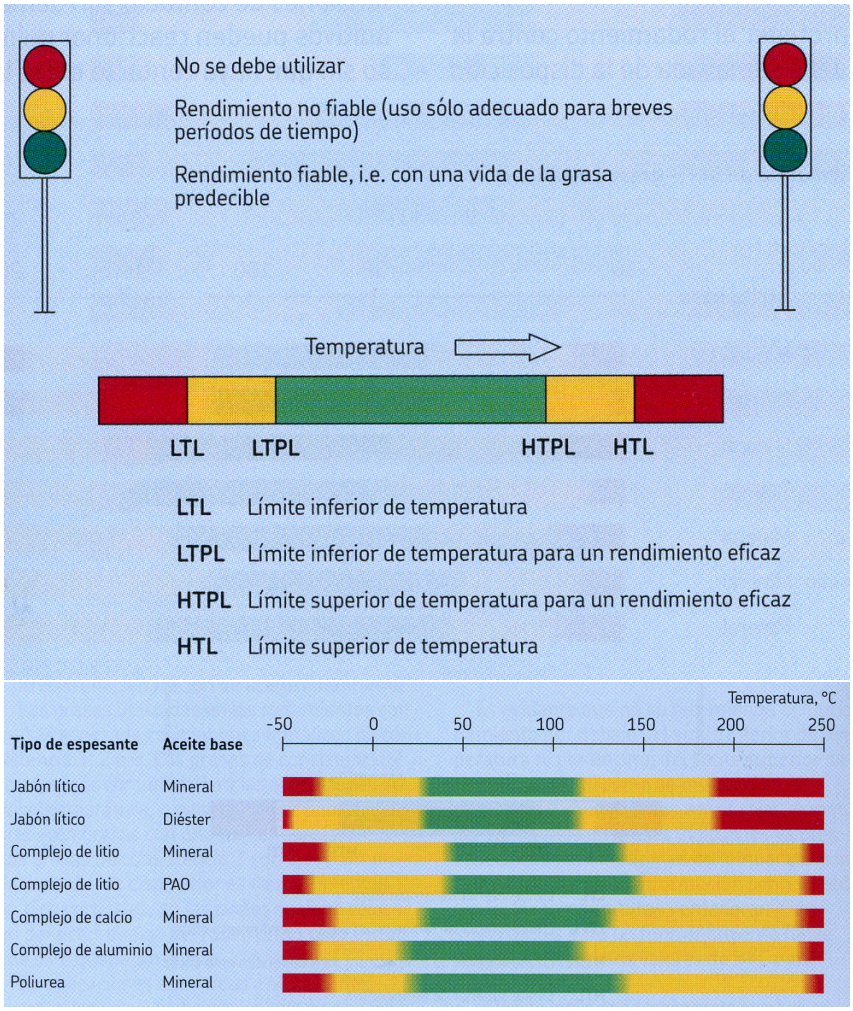


Figura 5.26: Relación temperatura versus grasas. Semáforo de colores usado por la SKF

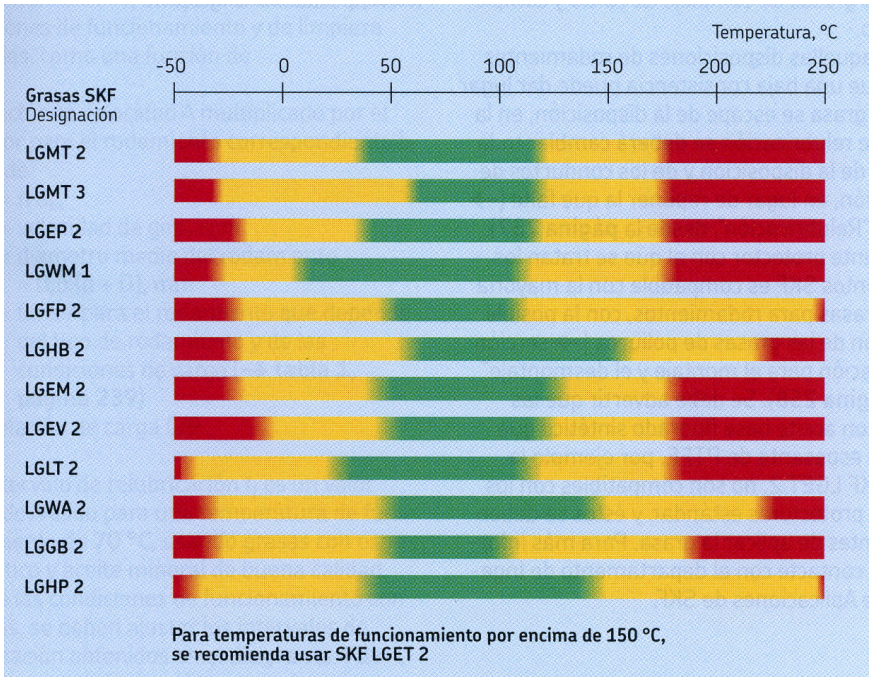


Figura 5.27: Concepto de semáforo usado en sus grasas: SKF

Tabla de comparación de grasas SKF

Condiciones de funcionamiento del rodamiento	Temperatura	Velocidad	Carga	Eje vertical	Rotación rápida del aro exterior	Movimientos oscilantes	Vibración severa	Carga de choque o arranque frecuente	Bajo nivel de ruido	Baja fricción	Propiedades anti-oxidantes
LGMT 2	M	M	L a M	O	I	I	+	I	I	O	+
LGMT 3	M	M	L a M	+	O	I	+	I	I	O	O
LGEP 2	M	L a M	H	O	I	O	+	+	I	I	+
LGFP 2	M	M	L a M	O	I	I	I	I	I	O	+
LGEM 2	M	VL	H a VH	O	I	+	+	+	I	I	+
LGEV 2	M	VL	H a VH	O	I	+	+	+	I	I	+
LGLT 2	L a M	M a EH	L	O	I	I	I	O	+	+	O
LGGB 2	L a M	L a M	M a H	O	I	+	+	+	I	O	O
LGWM 1	L a M	L a M	H	I	I	+	I	+	I	I	+
LGWM 2	L a M	L a M	M a H	O	O	+	+	+	I	I	+
LGWA 2	M a H	L a M	L a H	O	O	O	O	+	I	O	+
LGHB 2	M a H	VL a M	H a VH	O	+	+	+	+	I	I	+
LGHP 2	M a H	M a H	L a M	+	I	I	O	O	+	O	+
LGET 2	VH	L a M	H a VH	O	+	+	O	O	I	I	O

(*1) LTL = Límite inferior de temperatura
HTPL = Límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz
(*2) mm^2/s a 40 °C / 104 °F = cSt.

(*3) LGGB 2 puede resistir picos de temperaturas de 120 °C
(*4) LGWA 2 puede resistir picos de temperaturas de 220 °C
(*5) LGHB 2 puede resistir picos de temperaturas de 200 °C

Figura 5.28: Espectro del uso de grasas obtenido del catálogo on-line SKF

Descripción	Gama de temperatura (*1)		Espesante / aceite base	Viscosidad del aceite base (*2)
	LTL	HTPL		
Uso general en la industria y automoción	-30 °C	120 °C	Jabón de litio/aceite mineral	110
Uso general en la industria y automoción	-30 °C	120 °C	Jabón de litio/aceite mineral	120
Extrema presión	-20 °C	110 °C	Jabón de litio/aceite mineral	200
Compatible con alimentos	-20 °C	110 °C	Complejo de aluminio / aceite blanco médico	130
Alta viscosidad mas aditivos sólidos	-20 °C	120 °C	Jabón de litio/aceite mineral	500
Viscosidad extremadamente alta con aditivos sólidos	-10 °C	120 °C	Jabón de litio-calcio/aceite mineral	1 020
Baja temperatura alta velocidad	-50 °C	110 °C	Jabón de litio/aceite de PAO	18
'Verde' biodegradable, baja toxicidad	-40 °C	90 °C (*3)	Jabón de litio-calcio/ aceite de éster sintético	110
Extrema presión, baja temperatura	-30 °C	110 °C	Jabón de litio/aceite mineral	200
Para cargas elevadas y amplio rango de temperatura	-40 °C	110 °C	Complejo de sulfonato cálcico / sintético (PAO)/ mineral	80
Amplia gama de temperatura (*4)	-30 °C	140 °C	Jabón complejo de litio/ aceite mineral	185
EP alta viscosidad, alta temperatura (*5)	-20 °C	150 °C	Sulfonato complejo de cálcio/ aceite mineral	400
Alto rendimiento grasa de poliurea	-40 °C	150 °C	Di-urea/aceite mineral	96
Temperatura extrema	-40 °C	260 °C	PTFE/sintético (poliéster fluorado)	400

+ = Recomendado O = Adecuado — = No adecuado

Figura 5.29: Espectro del uso de grasas obtenido del catálogo on-line SKF

Selección de grasas

Generalmente utilizada si: Velocidad = M, Temperatura = M y Carga = M	LGMT 2	Uso general
Salvo para:		
Rodamientos con una temperatura esperada continua > 100 °C	LGHP 2	Temperatura alta
La temperatura esperada para el rodamiento es continuamente > 150 °C, se requiere una resistencia a la radiación	LGET 2	Temperatura extremadamente alta
Bajas temperaturas ambiente -50 °C, temperatura del rodamiento esperada < 50 °C	LGLT 2	Temperatura baja
Cargas de choque, cargas elevadas, arranques / paradas frecuentes	LGEP 2	Carga alta
Industria de alimentación	LGFP 2	Proceso de alimentos
Biodegradable "Verde", para aplicaciones que requieren baja toxicidad	LGGB 2	"Verde"

Nota: - Cuando la temperatura ambiente sea relativamente alta, utilice la grasa LGMT 3 en vez de la LGMT 2
- Para condiciones de funcionamiento especiales, consulte la tabla de selección de grasas SKF

Figura 5.30: Espectro del uso de grasas obtenido del catálogo on-line SKF

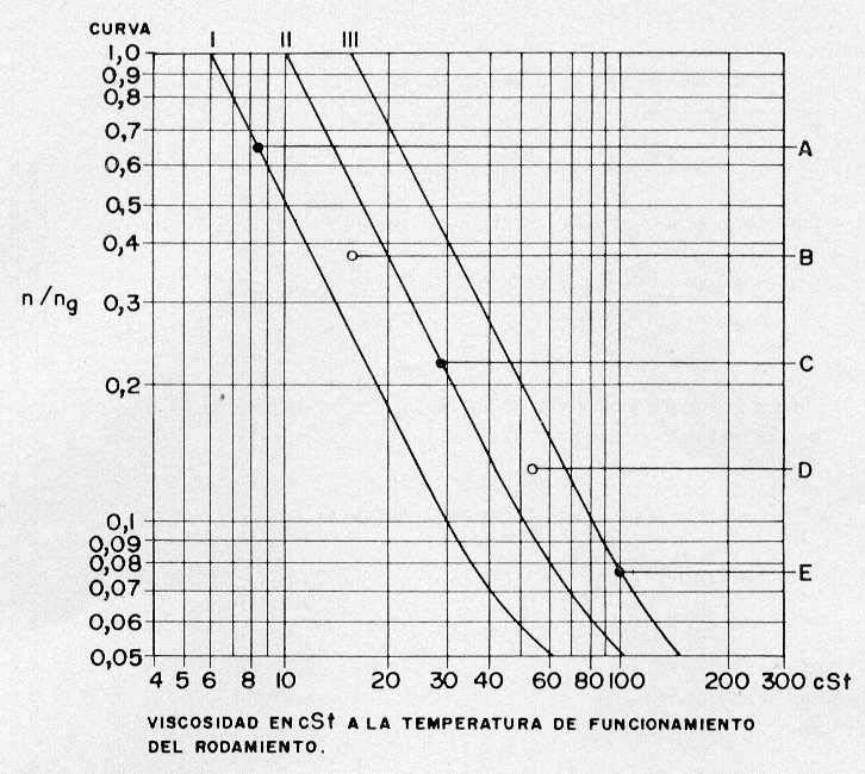


Figura 5.31: Cálculo de la viscosidad del aceite en cSt para lubricar un rodamiento

que se presente demasiada formación de espuma y altas temperaturas, lo cual requiere frecuencias más periódicas de cambio del aceite.

3. Para velocidades de giro del rodamiento por debajo de $0{,}1n_g$, se deben utilizar aditivos EP y la viscosidad se debe incrementar en 2 veces el valor calculado.

En el gráfico de la figura 5.31, A, B, C, D y E son las zonas que delimitan el tipo de rodamiento. Así:

- A : Rodamiento de rodillo cilíndrico cargado radialmente
- B : Rodamiento rígido de bolas, de contacto angular y de bolas a rótula.
  - Curva I para carga radial
  - Curva II para carga axial
- C : Rodamientos rígidos de doble hilera de bolas
- D : Rodamiento de rodillos cónicos y de rodillos a rótula
  - Curva II para carga radial
  - Curva III para carga axial
- E : Rodamientos axiales de bolas de simple efecto, axiales oscilantes de rodillos, axiales de rodillos cilíndricos y oscilantes de una hilera de rodillos

Una vez determinado el grado ISO del aceite requerido, se analizan las demás características que debe poseer el aceite y se busca el más apropiado en los catálogos de los fabricantes. Se debe recordar que no siempre el aceite más costoso es el mejor para una aplicación específica.

5.4. Cálculo del tipo de lubricación

Lo primero a determinar es si se está en presencia de un tipo de lubricación fluída o EHL. Para ello se calculo el parámetro de seguridad λ de la película de lubricante. Adicionalmente si se trata de lubricación EHL, λ define el tipo de aditivo de EP a utilizar: 1era, 2da o 3ra generación.

El factor de seguridad λ se puede calcular de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{h_0}{\bar{\sigma}}$$

En el caso de los rodamientos se puede utilizar la teoría EHL para verificar el factor de seguridad de la película lubricante, el cual debe estar comprendido entre 1.3 y 2.6 para rodamientos de bolas y entre 1.3 y 2.4 para rodamientos de rodillos.

donde: h_0 es el espesor mínimo de la película lubricante en μm. Se calcula de acuerdo al tipo de rodamiento:

- Para rodamientos de bolas y de rodillos cargados radialmente:

$$h_0 = CD(Ln)^{0,74} \quad \mu m$$

- Para rodamientos axiales de bolas y de rodillos:

$$h_0 = 0{,}00389 R_R^{0,26}(Ln)^{0,74} \quad \mu m$$

C : factor geométrico del rodamiento. Se selecciona de la Tabla 14.10(a) de acuerdo al tipo de rodamiento.

Tipo de rodamiento	Anillo que gira	
	Interior	exterior
De bolas	8.65 x 10-4	9.43 x 10-4
De rodillos cilíndricos	8.37 x 10-4	8.99 x 10-4
De rodillos cónicos y de aguja	8.01 x 10-4	-

Figura 5.32: Factor Geométrico C

D : diámetro exterior del rodamiento, (m)

L : parámetro del lubricante (s). Se determina del gráfico 14.10(b) en función del grado ISO del aceite y de la temperatura de operación del rodamiento. $L = \alpha\eta$ (s), donde es un lubricante de presión viscosidad en m^2/N y η es la viscosidad absoluta del aceite a la temperatura de operación en Ns/m^2.

n : velocidad del rodamiento (rpm). Si ambas pistas giran n es la diferencia de velocidades entre el aro interior y el exterior.

R_B : radio de paso (m)

R_R : radio de la esfera o del rodillo en su longitud media, (m)

$\bar{\sigma}$:promedio geométrico de las rugosidades μm). Se calcula como: $\bar{\sigma} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$ μm. Con σ_1 la rugosidad de la superficie del elemento rodante y σ_2 la del camino de rodadura.

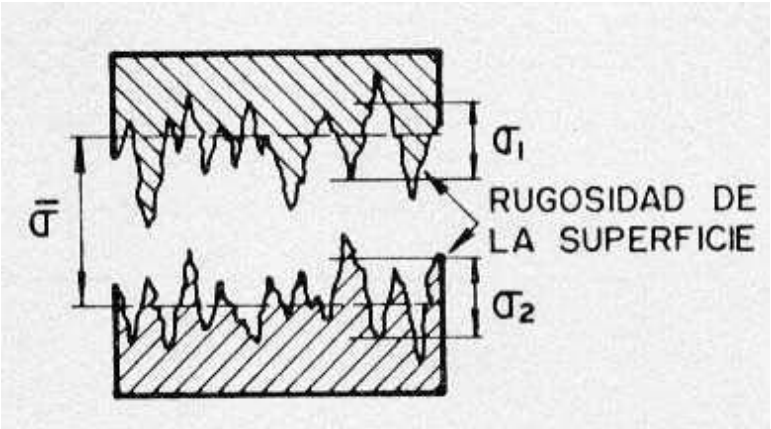


Figura 5.33: Definición de rugosidad σ

El valor de σ se determina de la Tabla 14.10(b), de acuerdo con el tipo de rodamiento.

Tipo de rodamiento	Valor de σ	
	μ"	μm
De bolas	0.059	2.33
De rodillos cilindricos	0.118	4.66
De rodillos cónicos y de agujas	0.076	2.99

Figura 5.34: Valores típicos de σ para diferentes tipos de rodamientos

En la figura **??**, se puede encontrar la relación entre h_o y λ, y en la figura **??** la relación entre h_o y su influencia en la vida a la fatiga del rodamiento. Bajo ninguna circunstancia es permisible un valor de λ menor de 1.

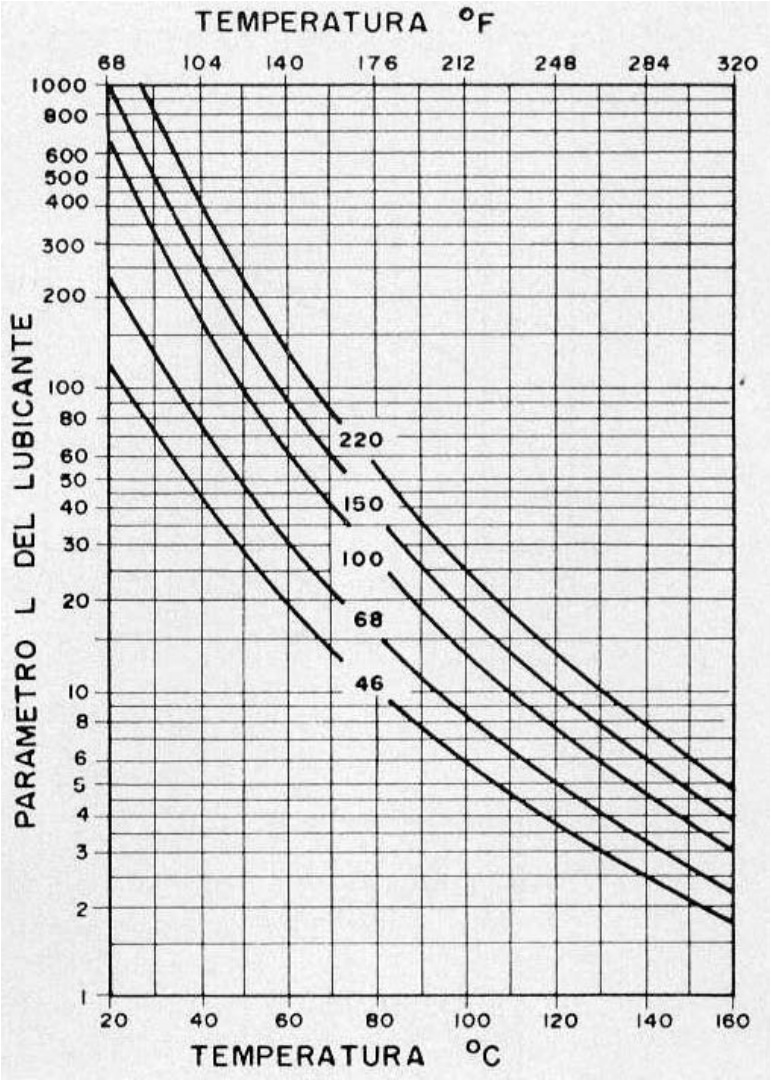


Figura 5.35: Cálculo del parámetro L del lubricante

No	Mecanismo	Tipo de película lubricante			
		Lubricación Hidrodinámica (HD) – AW	Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)		
			1ra generación EP_1	2da generación EP_2	3ra generación EP_3
01	Rodamiento	$2,5 \leq \lambda \leq 4,0$	$0,5 \leq \lambda < 2,5$	$0,1 \leq \lambda < 0,5$	$0,05 \leq \lambda < 0,1$
02	Cojinetes lisos	$2,0 \leq \lambda \leq 4,0$	$0,5 \leq \lambda < 2,0$	$0,1 \leq \lambda < 0,5$	$0,05 \leq \lambda < 0,1$
03	Engranajes	$1,5 \leq \lambda \leq 3,0$	$0,5 \leq \lambda < 1,5$	$0,1 \leq \lambda < 0,5$	$0,05 \leq \lambda < 0,1$

Nota:

(1) En el caso de cojinetes lisos, cuando se tienen valores del factor de seguridad de la película lubricante λ menores de 0,05, el tipo de lubricación, necesariamente debe ser hidrostática.

(2) En el caso de rodamientos y engranajes, cuando se tienen valores del factor de seguridad de la película lubricante λ menores de 0,05, no hay lubricantes con aditivos EP disponibles en el mercado que soporten esta condición de lubricación, por lo que es necesario contar con rodamientos y engranajes con mayor capacidad de carga.

(3) AW o Anti Desgaste, quiere decir que el aceite debe tener aditivos antidesgaste, por lo regular a base de Ditiosfosfato de Zinc.

(4) EP o Extrema Presión, quiere decir que el aceite debe tener aditivos de Extrema Presión. El tipo de aditivo depende de la generación del lubricante.

Figura 5.36: Valor de λ asociado al tipo de lubricación

Capítulo 6

Engranajes

Al igual que en el caso de los rodamientos, la selección de lubricante adecuado a los requerimientos de un engranaje se basa en la definición del factor de seguridad λ de la película de lubricante, el cual se estima gráficamente en función de la velocidad lineal del punto de paso en el engrane, al como se muestra en la figura 6.1.

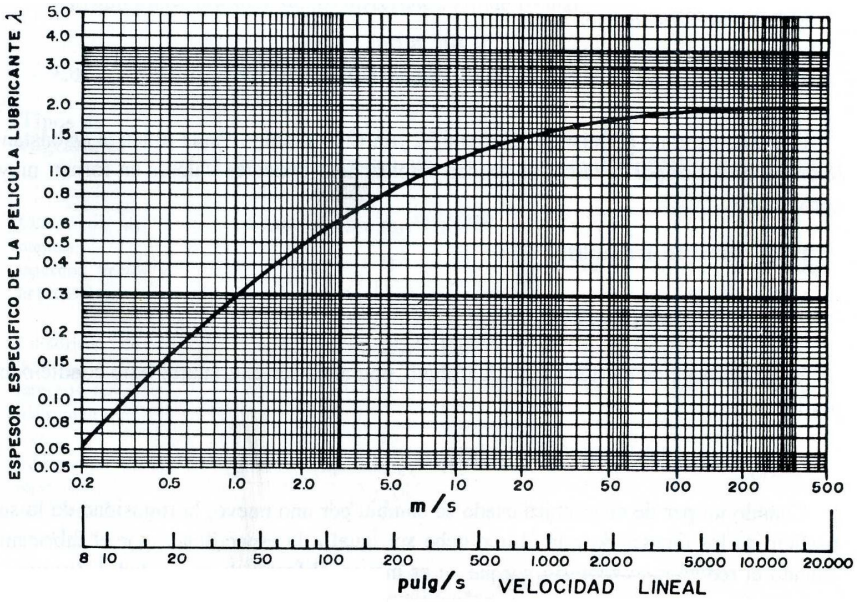


Figura 6.1: Determinación del parámetro λ

Como los cálculos en un reductor de engranajes indican que las mayores

cargas se producen en la etapa de salida, estos cálculos se basan en obtener la lubricación óptima para el eje de salida (el más cargado), es decir, donde se tienen las menores velocidades y las mayores cargas.

La metodología basada en estos conceptos ha sido desarrollada por varios autores, entre los cuales destacan Dowson, Townsen y Fowles. Se propone un método má exacto basado en el cálculo del parámetro lubricante L y con él y la temperatura de operación encontrar el lubricante adecuado.

$$L = \frac{h_0^{1,35} W_T^{0,148}}{G n_p} \tag{6.1}$$

donde:
h_0 es el espesor mínimo de película en μm y se calcula de acuerdo a la fórmula vista:

$$h_0 = \lambda \bar{\sigma}$$

Para engranajes el valor de $\bar{\sigma}$ es difícil de medir (engranajes son fabricados por diferentes maestranzas). Se acostumbra a aproximar este valor de acuerdo a:

- Valor inicial: 0,81 μm, (32μin)
- Después de un cierto tiempo de operación normal: 0,408 μm, (16μin)

Los valore smínimos permisibles para el espesor de la película lubricante h_0 calculado deben cumplir regirse de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 6.1

Cuadro 6.1: Interpretación del espesor mínimo de películo h_0

μm	μin	COMENTARIOS
1.26	50	satisfactorio para engranajes grandes abiertos
0.88 - 1.26	35 - 50	Marginal para engranajes grandes abiertos. Adecuado para engranajes encerrados
0.50 - 0.88	20 - 35	Satisfactorio para engranajes encerrados lubricados por presión
0.25 - 0.50	10 - 20	No es satisfactorio a no ser que el acabado de las superficies sea de alta calidad
0.25	10	No es permisible

Los valores de W_T; carga total transmitida por unidad de longitud del diente y G un parámetro geométrico, se calculan de acuerdo a las fórmulas dadas en la Tabla 6.2.

Cuadro 6.2: Fórmulas necesarias para seleccionar lubricante. A: cilíndrico, externo de dientes rectos y helicoidales, B: idem a A pero internos, C: cónicos, rectos y helicoidales con ejes a 90°

Tipo de engranaje	G	W_T	v
A	$\frac{3{,}4x10^{-4}(rhsen\phi_n)^{1,5}E_D^{0,148}}{(r+1)^2}$	$\frac{T_e(r+1)}{rhbcos\phi_n cos^2\varphi}$	$\frac{2\pi rhn_e}{60(r+1)}$
B	$\frac{3{,}4x10^{-4}(rhsen\phi_n)^{1,5}E_D^{0,148}}{(r-1)^2}$	$\frac{T_e(r-1)}{rhbcos\phi_n cos^2\varphi}$	$\frac{2\pi rhn_e}{60(r-1)}$
C	$\frac{3{,}4x10^{-4}(R_m sen\phi_n)^{1,5}E_D^{0,148}}{(1+r^2)^{0,25}}$	$\frac{T_e}{R_m bcos\phi_n cos^2\varphi_m}$	$\frac{2\pi R_m n_e}{60}$

r	Relación de reducción n_p/n_e ó D_e/D_p ; adimensional
h	distancia entre centros de ejes; m
b	longitud del diente ; m
R_m	radio de paso medio del engranaje; m
n_e	velocidad del engranaje mayor (corona); rpm
n_r	velocidad de la rueda o anillo; rpm
E_D	módulo equivalente de elasticidad
	$E_D = 2[\frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2}]^{-1}$
μ_i	módulo de Poisson de ambos materiales
	$\mu_i = \frac{E_i}{2G_i} - 1$
E_i	módulo de elasticidad de cada material
G_i	módulo de corte de cada material
T_e	torque en el engrane
	$T_e = \frac{KP}{n_e}$
K	constante: 9550 Nm y 63000 lbf-in
P	potencia transmitida; kW (HP)
T_r	torque de la rueda o anillo
ϕ_n	ángulo de presión normal (20°)
φ	ángulo de hélice (dientes rectos $\varphi = 0$)
	$\varphi = cos^{-1}(a/b)$
a	ancho del diente; m
b	longitud del diente; m
φ_m	ángulo de la espiral para engranajes cónicos

Cuadro 6.3: Valores de módulos de elasticidad y corte

Tipo de material	E MPa	G MPa
Aceros aleados y no aleados	2.07	0.79
Bronce fosforoso	1.24	0.41
Aleaciones de Ni	1.79 - 2.07	0.79
Aleaciones de Cu	1.03 - 1.24	0.44
Aleaciones de Al	0.69 - 0.75	0.26
Aleaciones de Magnesio	0.44	0.16
Hierro fundido	1.03 - 1.51	0.41
Hierro maleable	1.79 - 1.86	0.41

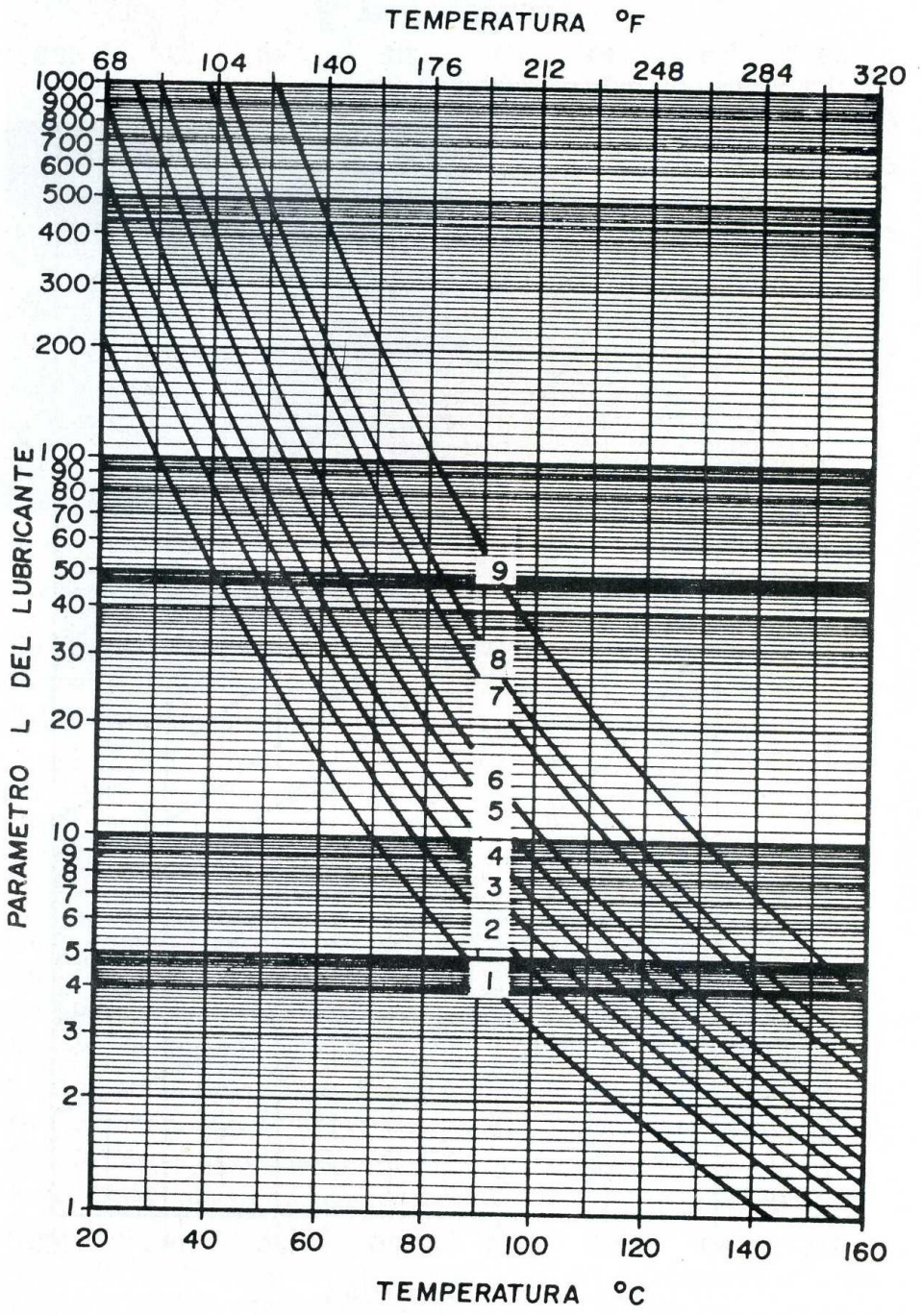


Figura 6.2: Parámetro del Lubricante L de aceites minerales según código AGMA

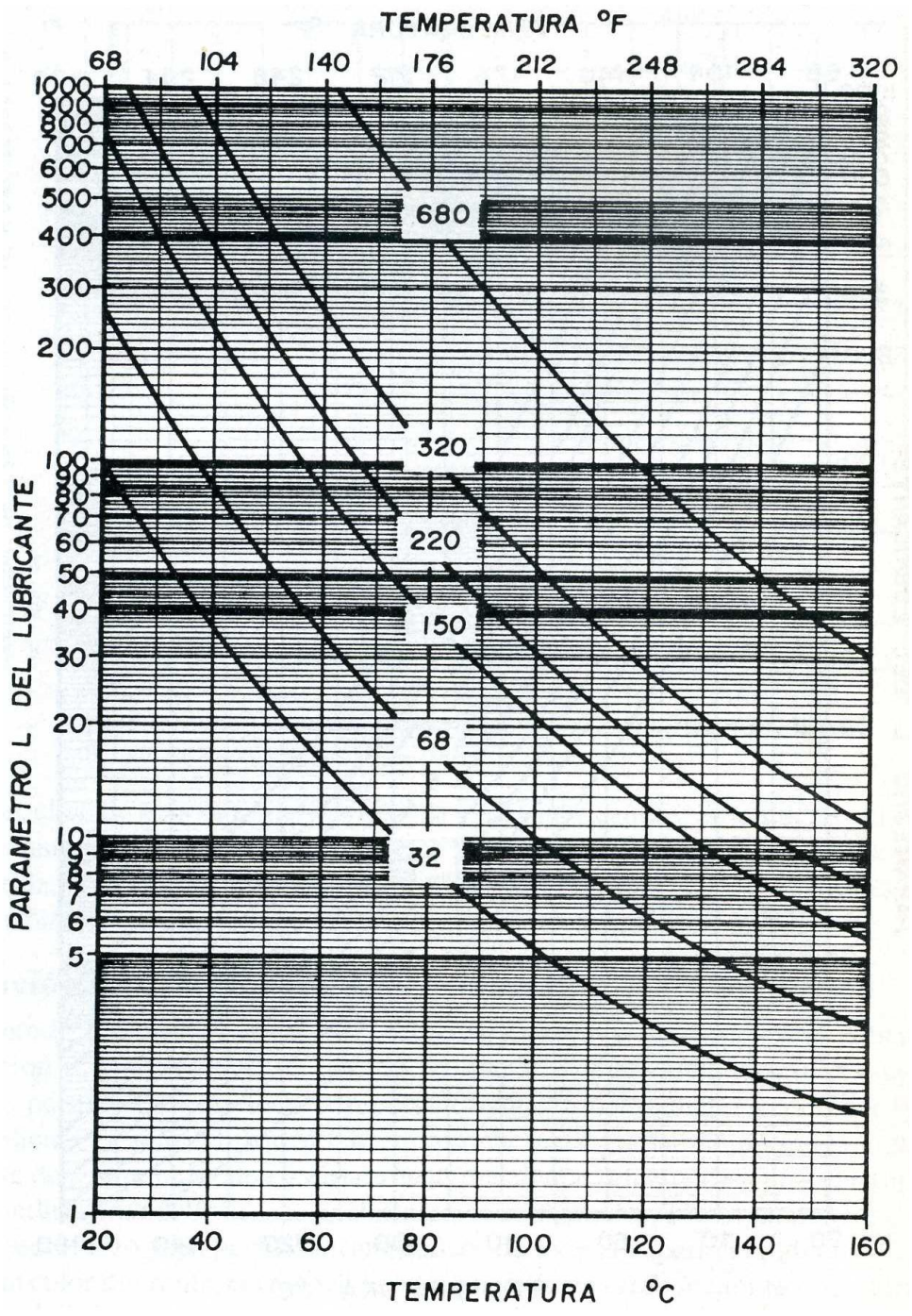


Figura 6.3: Parámetro de lubricantes L de aceites sintéticos según código ISO

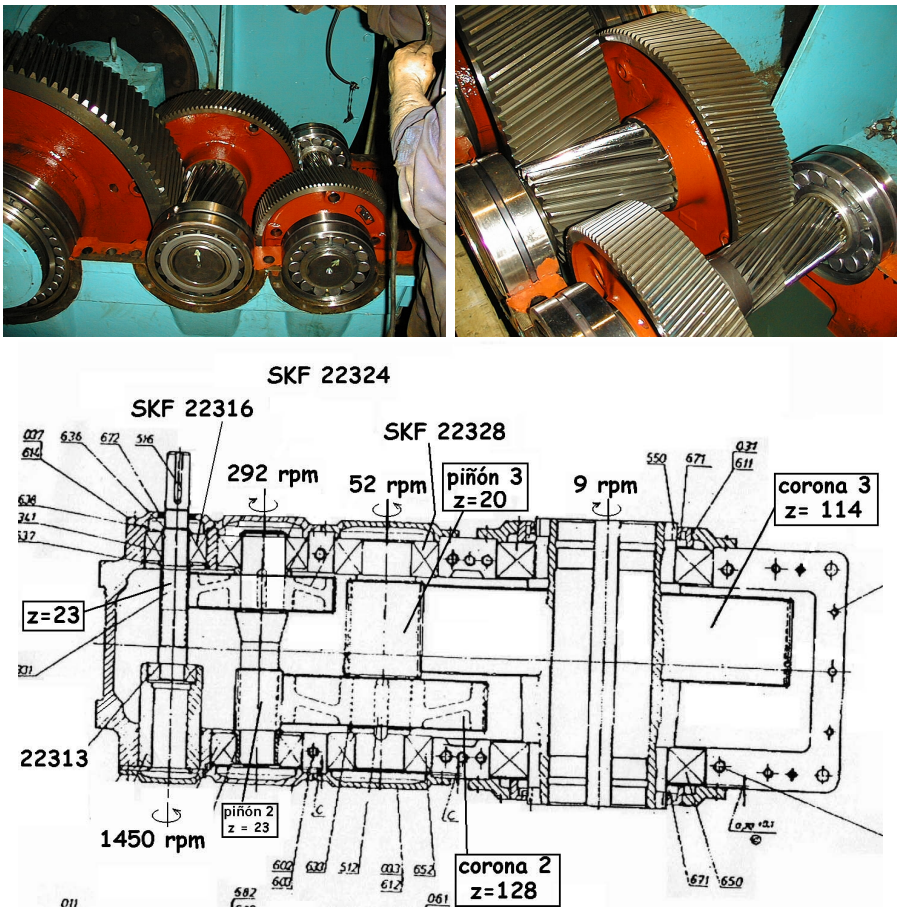


Figura 6.4: Reductor de engranajes helicoidales pesquera

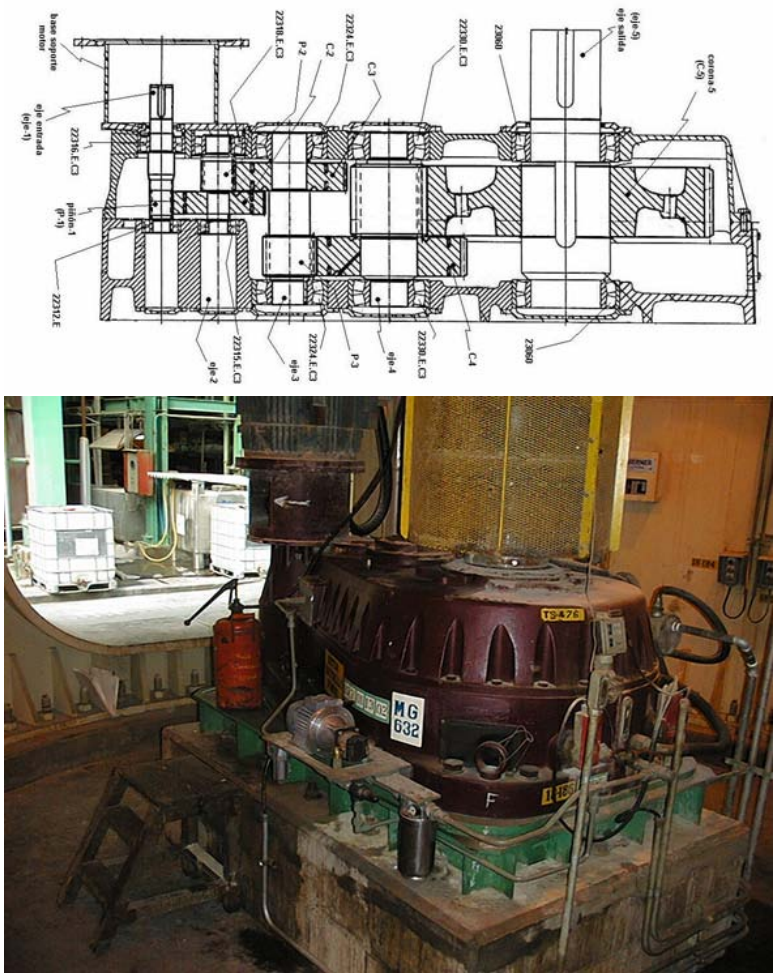


Figura 6.5: a. Plano reductor digestor de Celulosa, b. Foto reductor real

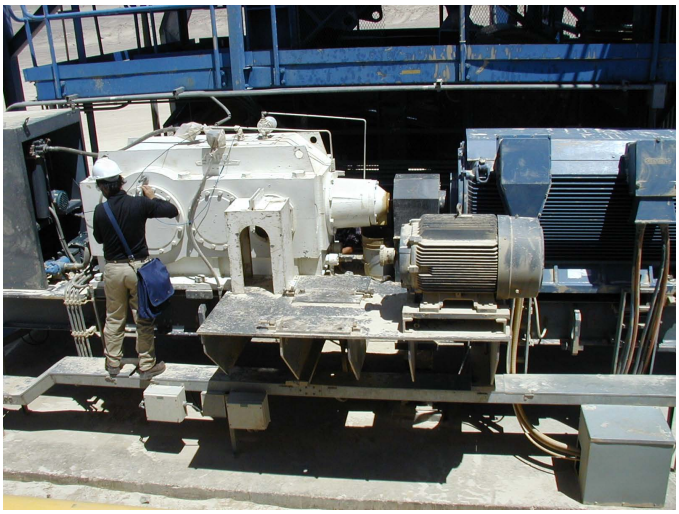


Figura 6.6: Reductor de sistema motriz de correa transportadora

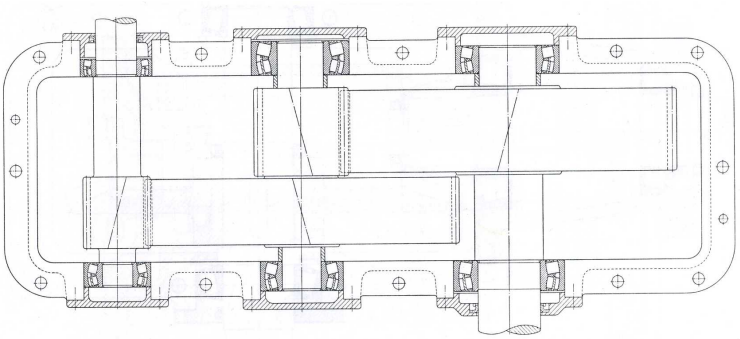
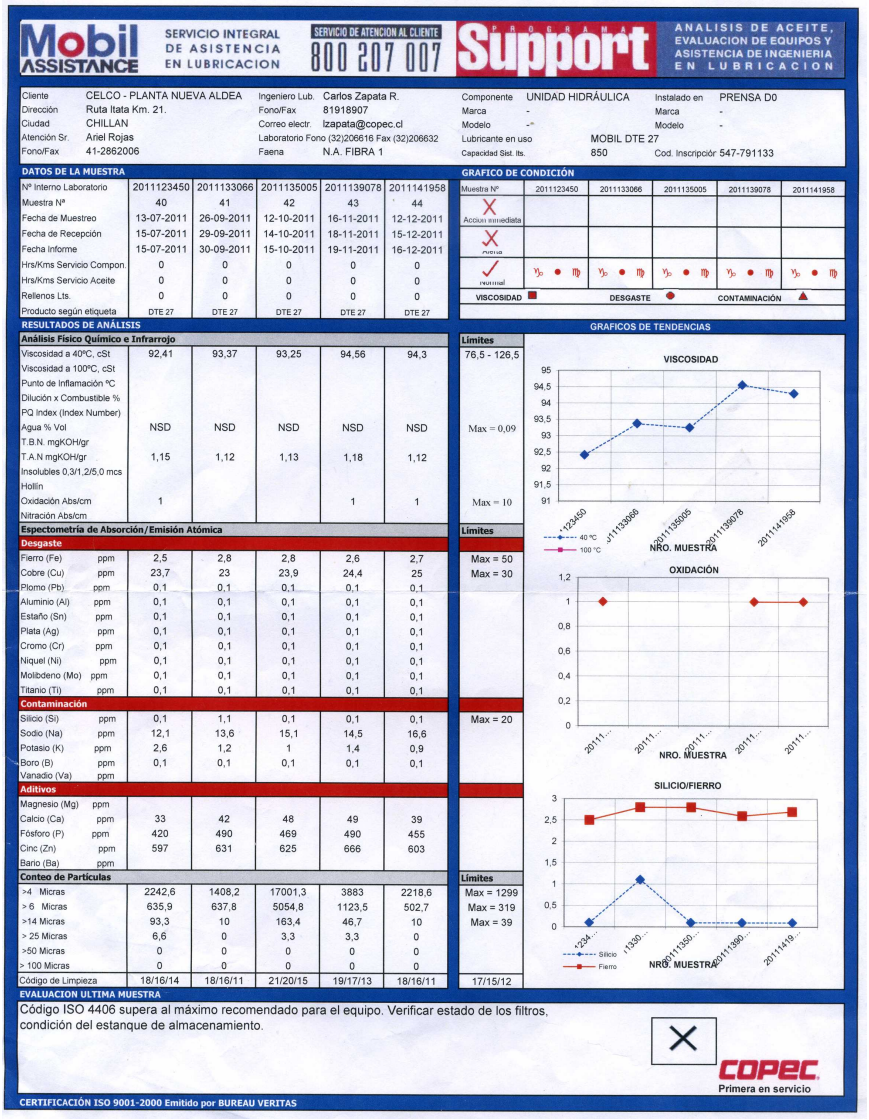


Figura 6.7: Reductor engranajes helicoidales



Mobil ASSISTANCE — SERVICIO INTEGRAL DE ASISTENCIA EN LUBRICACION — SERVICIO DE ATENCION AL CLIENTE 800 207 007 — PROGRAMA Support — ANALISIS DE ACEITE, EVALUACION DE EQUIPOS Y ASISTENCIA DE INGENIERIA EN LUBRICACION

Cliente	CELCO - PLANTA NUEVA ALDEA	Ingeniero Lub.	Carlos Zapata R.	Componente	UNIDAD HIDRÁULICA	Instalado en	PRENSA D0
Dirección	Ruta Itata Km. 21.	Fono/Fax	81918907	Marca	-	Marca	-
Ciudad	CHILLAN	Correo electr.	lzapata@copec.cl	Modelo	-	Modelo	-
Atención Sr.	Ariel Rojas	Laboratorio	Fono (32)206616 Fax (32)206632	Lubricante en uso	MOBIL DTE 27		
Fono/Fax	41-2862006	Faena	N.A. FIBRA 1	Capacidad Sist. lts.	850	Cod. Inscripción	547-791133

DATOS DE LA MUESTRA

Nº Interno Laboratorio	2011123450	2011133066	2011135005	2011139078	2011141958	Límites
Muestra Nº	40	41	42	43	44	
Fecha de Muestreo	13-07-2011	26-09-2011	12-10-2011	16-11-2011	12-12-2011	
Fecha de Recepción	15-07-2011	29-09-2011	14-10-2011	18-11-2011	15-12-2011	
Fecha Informe	15-07-2011	30-09-2011	15-10-2011	19-11-2011	16-12-2011	
Hrs/Kms Servicio Compon.	0	0	0	0	0	
Hrs/Kms Servicio Aceite	0	0	0	0	0	
Rellenos Lts.	0	0	0	0	0	
Producto según etiqueta	DTE 27	DTE 27	DTE 27	DTE 27	DTE 27	
RESULTADOS DE ANÁLISIS						
Análisis Físico Químico e Infrarrojo						
Viscosidad a 40ºC, cSt	92,41	93,37	93,25	94,56	94,3	76,5 - 126,5
Viscosidad a 100ºC, cSt						
Punto de Inflamación ºC						
Dilución x Combustible %						
PQ Index (Index Number)						
Agua % Vol	NSD	NSD	NSD	NSD	NSD	Max = 0,09
T.B.N. mgKOH/gr						
T.A.N mgKOH/gr	1,15	1,12	1,13	1,18	1,12	
Insolubles 0,3/1,2/5,0 mcs						
Hollín						
Oxidación Abs/cm	1			1	1	Max = 10
Nitración Abs/cm						
Espectometría de Absorción/Emisión Atómica						**Límites**
Desgaste						
Fierro (Fe) ppm	2,5	2,8	2,8	2,6	2,7	Max = 50
Cobre (Cu) ppm	23,7	23	23,9	24,4	25	Max = 30
Plomo (Pb) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Aluminio (Al) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Estaño (Sn) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Plata (Ag) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Cromo (Cr) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Niquel (Ni) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Molibdeno (Mo) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Titanio (Ti) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Contaminación						
Silicio (Si) ppm	0,1	1,1	0,1	0,1	0,1	Max = 20
Sodio (Na) ppm	12,1	13,6	15,1	14,5	16,6	
Potasio (K) ppm	2,6	1,2	1	1,4	0,9	
Boro (B) ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Vanadio (Va) ppm						
Aditivos						
Magnesio (Mg) ppm						
Calcio (Ca) ppm	33	42	48	49	39	
Fósforo (P) ppm	420	490	469	490	455	
Cinc (Zn) ppm	597	631	625	666	603	
Bario (Ba) ppm						
Conteo de Partículas						**Límites**
>4 Micras	2242,6	1408,2	17001,3	3883	2218,6	Max = 1299
> 6 Micras	635,9	637,8	5054,8	1123,5	502,7	Max = 319
>14 Micras	93,3	10	163,4	46,7	10	Max = 39
> 25 Micras	6,6	0	3,3	3,3	0	
>50 Micras	0	0	0	0	0	
> 100 Micras	0	0	0	0	0	
Código de Limpieza	18/16/14	18/16/11	21/20/15	19/17/13	18/16/11	17/15/12

GRAFICO DE CONDICIÓN

Muestra Nº:	2011123450	2011133066	2011135005	2011139078	2011141958
Acción inmediata					
Aviso					
Normal					

VISCOSIDAD ■ DESGASTE ● CONTAMINACIÓN ▲

GRAFICOS DE TENDENCIAS

EVALUACION ULTIMA MUESTRA

Código ISO 4406 supera el máximo recomendado para el equipo. Verificar estado de los filtros, condición del estanque de almacenamiento.

COPEC Primera en servicio

CERTIFICACIÓN ISO 9001-2000 Emitido por BUREAU VERITAS

Figura 6.8: Ejemplo de un análisis de aceite realizado por la MOBIL

Capítulo 7

Análisis de aceite

Una clasificación simple respecto a los diversos análisis de aceite se definen en la tabla 7.1, asociándolo en cada caso al tipo de mantenimiento que se está realizando.

Cuadro 7.1: Identificación de Problemas en máquinas

Pruebas Posibles	**Propiedades de los fluidos**	**Contaminación**	**Partículas de desgaste**
Conteo partículas	$\otimes$	$\oplus$	$\ominus$
Análisis de humedad	$\otimes$	$\oplus$	$\otimes$
Análisis de viscosidad	$\oplus$	$\ominus$	$\otimes$
Densidad de partículas	$\otimes$	$\otimes$	$\oplus$
Ferrografía analítica	$\otimes$	$\ominus$	$\oplus$
TAN / TBN	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$
FTIR	$\oplus$	$\ominus$	$\otimes$
Prueba de membrana	$\otimes$	$\oplus$	$\oplus$
Punto de inflamación	$\ominus$	$\oplus$	$\otimes$
Análisis de elementos	$\oplus$	$\ominus$	$\oplus$
$\otimes$ principal beneficio $\oplus$ beneficio menor $\ominus$ sin beneficio	PROACTIVO	PROACTIVO	PREVENTIVO

En la actualidad es muy usado el concepto de *Análisis de aceite* como técnica de monitoreo de máquinas principalmente críticas. Ya es común pensar en que un buen análisis de aceite es capaz de detectar con mucho mayor premura defectos que más adelante comienzan a ser detectados por el análi-

sis de vibraciones. De ahí a que en la actualidad ha aumentado mucho la aplicación de esta técnica.

Generalmente se ha dejado por parte de la empresa solicitante del servicio, que las empresas proveedoras de combustibles, lubricantes y también de aceites hidraulicos sea quien reralice estos servicios de análisis. Por ejemplo la figura 7.2 muestra un análisis de aceite por medio de Ferrografía Analítica.

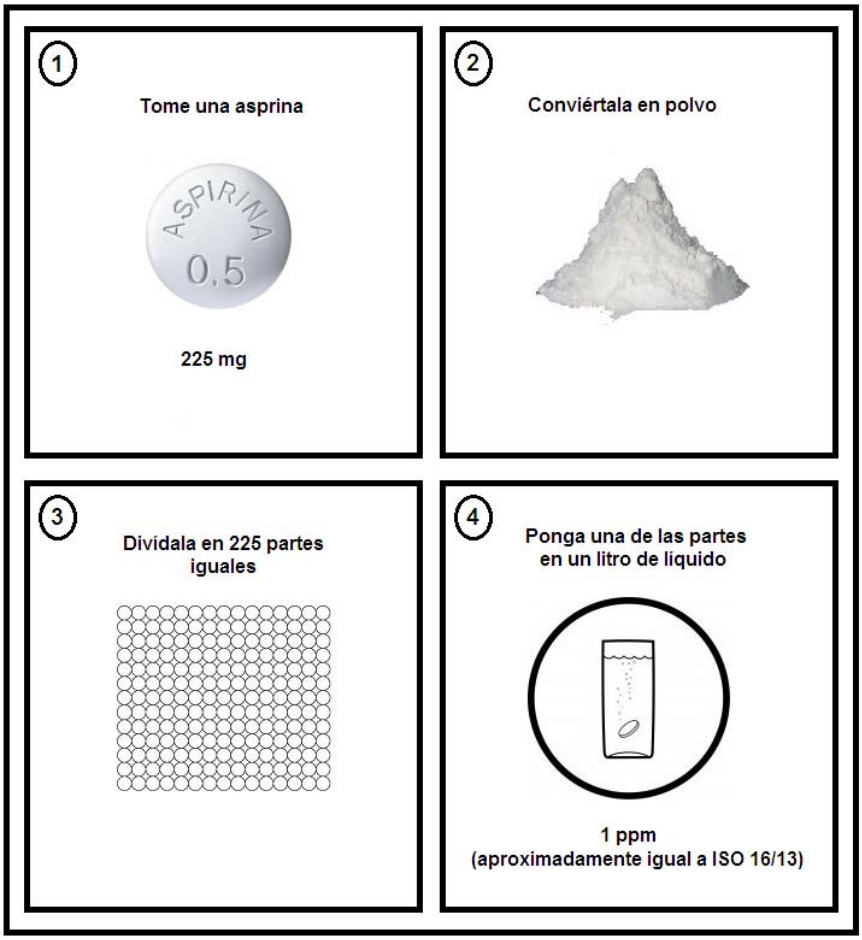


Figura 7.1: Definición gráfica del concepto "partes por millón"

7.1. Ferrografía directa (conteo de partículas)

La ferrografía directa consiste en una medición cuantitativa de la concentración de las partículas ferrosas en una muestra de fluido a través de la precipitación de esas partículas en un tubo de vidrio sometido a un fuerte campo magnético. Dos rayos de luz transportados por fibra óptica impactan sobre el tubo en dos posiciones correspondientes a la localización en la cual las partículas grandes y las pequeñas serán depositadas por el campo magnético.

La luz es reducida en relación a las partículas depositadas en el tubo de vidrio y ésta reducción es monitoreada y medida electrónicamente. Dos conjuntos de lecturas son obtenidos de las grandes y pequeñas partículas (partículas por encima de 5 micras y partículas por debajo de 5 micras). Por lo general más de 20.000 partículas mayores de 5 micras indican una alerta de seguimiento y más de 40.000 son excesivas e indican problemas de desgaste en componentes ferrosos de la máquina.

7.2. Espectrofotometría de absorción atómica

Este análisis, en conjunto con el conteo de partículas, es el más popular en la implementación de programas de mantenimiento predictivo, debido a que en los centros industriales, los proveedores de lubricante ofrecen el servicio como un valor agregado a la venta.

El principio básico consiste en someter la muestra de lubricante a una fuente alto voltaje (15 kV) en la cual se calienta y libera energía. Fenómenos especiales de radiación se generan, en los cuales se pueden diferenciar y asignar las radiaciones a diferentes frecuencias a elementos específicos constituyentes del lubricante. La intensidad de radiación a una frecuencia específica es proporcional a la concentración de su respectivo elemento.

7.3. Ferrografía analítica

La ferrografía analítica se posiciona como una de las técnicas más importantes para el análisis de aceite. Cuando es implementada correctamente provee gran información de causa raíz. A pesar de sus capacidades es frecuentemente excluida de los programas de análisis de aceites, debido a que comparativamente, es bastante costosa. Además, es una prueba que requiere

tiempo, paciencia y alta habilidad (muy buen ojo) por parte del analista.

Por lo tanto, este análisis representa costos significativos que no se presentan en otros análisis de aceites. Por otra parte, los beneficios de la ferrografía analítica son muy representativos al lograr una clara identificación de modos de falla que ningún otro análisis provee.

Definición:
El principio de la ferrografía analítica consiste en separar sistemáticamente el material particulado suspendido en el lubricante, sobre una plaqueta de vidrio. La plaqueta es examinada bajo el microscopio para distinguir tamaño, concentración, composición, morfología y condición superficial de las partículas ferrosas y no ferrosas que caracterizan el desgaste. El examen detallado descubre los misterios de las condiciones de desgaste anormal apuntándolo hacia el componente fuente, con un excelente acercamiento a la causa raíz del problema.

7.4. Composición de partículas

Se identifican seis categorías de partículas:

1. Partículas blancas no ferrosas: frecuentemente son aluminio o cromo. Aparecen blancas brillantes antes y después del tratamiento térmico. Están depositadas aleatoriamente en la plaqueta con grandes partículas detenidas por las cadenas de las partículas ferrosas.

2. Partículas de cobre: usualmente aparecen como amarillo brillante antes y después del tratamiento térmico, aunque puede cambiar a verdegris. Esta también estará depositada aleatoriamente en la plaqueta con partículas grandes a la entrada y pequeñas a la salida.

3. Partículas del babbitt: consisten en partículas delgadas de color gris (se ven como trozos de lata). Después del tratamiento siguen grises pero con puntos azules y rojos, y mas pequeñas con apariencia motosa. Su distribución es aleatoria.

4. Contaminantes: usualmente son residuos de polvo principalmente silicio. Aparecen como unos cristales que son fácilmente identificados con la luz transmitida (verde). Su distribución es aleatoria.

SDE
Servicio Diagnóstico De Equipos

Shell

Maipú, 25 de Junio 2001

INFORME DE ANALISIS DE FERROGRAFIA

EMPRESA	CIA MINERA CANDELARIA	**EQUIPO N°**	PALA 4100 #20 TR. HOIST
ATT. SR.	Manuel Pastene	**SERIE**	
FAX		**HRS (KMS) COMPONENTE**	Sin información
FECHA MUESTRA	Sin información	**HRS (KMS) ACEITE**	Sin información
MUESTRA N°	192714	**LUBRICANTE**	BEL RAY GEAR 200 ISO 680

FERROGRAFIA ANALITICA

DILUCION ANALITICA 1:10

TIPO DE PARTICULAS	NINGUNA	TRAZAS	POCAS	MODERADO	MUCHAS
Partículas Desgaste Normal Fricción					
Partículas Desgaste Severo					
Partículas Desgaste por Corte					
Terrones					
Partículas Laminares					
Partículas Esféricas					
Partículas Oxidos Metálicos Obscuros					
Partículas Oxidos Rojos					
Partículas Desgaste por Corrosión					
Partículas Metálicas no Ferrosas					
Part. No metálicas Birrefringentes Inorgánica (Silice)					
Part. No metálicas Birrefringentes Orgánica					
Partículas No Metálicas Amorfas					
Polímeros de Fricción Normal					
Fibras					
Otras					

DIAGNOSTICO

NORMAL	PRECAUCION	ANORMAL

Figura 7.2: Informe de Ferrografía Analítica

5. Fibras: causadas por desprendimientos de filtros y contaminación externa. Son largas cadenas en variedad de colores y usualmente no cambian su apariencia después del tratamiento térmico. Algunas veces esas partículas actúan como filtro colectando otras partículas. Pueden aparecer en cualquier parte del ferrograma, aunque tienden a estar en la salida.

6. Partículas ferrosas: se identifican principalmente usando la luz roja (reflejada) y la luz blanca del microscopía. La luz transmitida es totalmente bloqueada por la partícula. Se dividen en cinco diferentes categorías:

   a) Acero de alta aleación: las partículas son encontradas en cadenas de color gris-blanco antes y después del tratamiento. La forma de diferenciar entre los aceros con alta aleación y las partículas blancas no ferrosas es la posición en la plaqueta. Si aparece en cadena es un acero, de otro modo es considerado un blanco no ferroso. Su aparición en ferrogramas es rara (es lo último que se espera que se desgaste).

   b) Acero de baja aleación: las partículas se encuentran en cadenas grisblancas, pero después de tratamiento térmico aparecen azules, rosas o rojas.

   c) Óxidos metálicos negros: depositados en cadenas de color gris oscuro o negros antes y después del tratamiento térmico. La cantidad de negro determina la severidad de oxidación.

   d) Fundición de hierro: aparece gris antes del tratamiento y amarillo opaco después.

   e) Óxidos rojos (Herrumbre): la luz polarizada los identifica rápidamente. Pueden ser encontrados en cadenas con otras partículas ferrosas o depositadas aleatoriamente en la plaqueta. Una gran cantidad de óxidos rojos de pequeño tamaño en la salida de la plaqueta son consideradas como un signo de desgaste corrosivo. Aparece como una playa de arena roja.

Una clasificación mas extensa se muestra en la Tabla 7.2. En ella se detalla todos los posible origenes de las partículas contaminantes en una máquina

Después de la clasificación e identificación de la composición el analista pondera el tamaño de las partículas usando una escala micrométrica en el ocular del microscopio. Partículas con un tamaño mayor de 30 micras definen

Material	Posible origen
Silicio	polvo, aditivos antiespumantes
Calcio	polvo, aditivos detergentes
Bario	Magnesio: aditivos detergentes
Hierro	engranajes y rodamientos
Cobre	babbitt de cojinetes de fricción o separadores de rodamientos
Cromo	anillos y camisas de pistón
Aluminio	pistones
Estaño, Cobre, Plata	cojinetes
Plomo	contaminación con gasolina
Vanadio, Sodio	combustible quemado

Figura 7.3: Partículas metálicas asociadas a máquinas

condiciones severas o anormales. Frecuentemente la forma de la partícula es una clave importante sobre el origen del desgaste.

¿La partícula es laminar o rugosa? Las partículas laminares indican aplastamiento en las áreas de rodamientos por alta presión o contacto lateral.

¿La partícula tiene una forma curva similar a una hoz?. Esto caracteriza desgaste cortante producido por contaminantes abrasivos.

¿Tiene la partícula estrías en su superficie?. Las estrías son signos de desgaste por arrastre sin lubricación. Puede ser generado en un área donde ocurren arranques de superficies metálicas.

¿La partícula es esférica oscura con centro blanco?. Las esferas son generadas en presencia de fatiga en los rodamientos. Un incremento en ellas indica exfoliación.

7.5. Conteo de partículas

Se utiliza un instrumento basado en óptica láser, capaz de medir partículas de tamaño mayor a $2\mu m$ presentes en una muestra de aceite sin especificar el tipo de material. Trabajan en base a normas internacionales de filtración tales como: ISO 4406 y NAS 1638.

La más usada por la norma ISO que permite clasificar partículas en tres rangos de tamaño: $\geq 2\mu m$, $\geq 5\mu m$, $\geq 15\mu m$. La usada en Chile que permite clasificar partículas en los siguientes tres rangos de tamaño: $\geq 4\mu m$, $\geq 6\mu m$, $\geq 14\mu m$.

7.6. Filtros

Se usa tres tipos de denominaciones cuando se refiere a filtrado de partículas.

1. Tasa Nominal.

   Una medida arbitraria en micras, basada en el porcentaje de remoción de contaminantes, indicada por el fabricante del filtro. No se considera representativa por su falta de reproducibilidad.

2. Tasa Absoluta.
   El tamaño en micrones de la partícula dura más grande y esférica que pasa por el elemento filtrante.

3. Tasa Beta (β_x)

   Es el cuociente del número de partículas iguales o mayores a un tamaño dado x en el fluído entrante con respecto a las partículas del mismo tamaño x en el fluído saliente. Expresado como fórmula:

$$\beta_x = \frac{Nparticulas > que \quad 10 \quad micras \quad antes \quad del \quad filtro}{Nparticulas > que \quad 10 \quad micras \quad despues \quad del \quad filtro}$$

Por ejemplo, si se tiene un filtro del tipo:

$$\beta_{10} = \frac{10}{1} = 10$$

Implica que dicho filtro dejará pasar 1 partícula de cada 10 de tamaño mayor o igual a $10micras$. La eficiencia η del filtro se cuantifica según la fórmula;

$$\eta = \frac{\beta - 1}{\beta}\,\%$$

Recomendaciones de filtrado para distintos tipos de máquinas se muestran en la Tabla 7.8

Particle Concentration (number of particles per)			ISO Range Number
# per ml		# per 100 ML	
More than	Up to and including		
5 000 000	10 000 000	500M – 1000M	30
2 000 000	5 000 000	200M – 500M	29
1 300 000	2 000 000	130M – 200M	28
640 000	1 300 000	64M – 130M	27
320 000	640 000	32M – 64M	26
160 000	320 000	16M – 32M	25
80 000	160 000	8M – 16M	24
40 000	80 000	4M – 8M	23
20 000	40 000	2M – 4M	22
10 000	20 000	1M – 2M	21
5 000	10 000	500K – 1M	20
2 500	5 000	250K – 500K	19
1 300	2 500	130K – 250K	18
640	1 300	64K – 130K	17
320	640	32K – 64K	16
160	320	16K – 32K	15
80	160	8K – 16K	14
40	80	4000 – 8000	13
20	40	2000 – 4000	12
10	20	1000 – 2000	11
5	10	500 – 1000	10
2.5	5	250 – 500	9
1.3	2.5	130 – 250	8
0.64	1.3	64 – 130	7
0.32	0.64	32 – 64	6
0.16	0.32	16 – 32	5
0.08	0.16	8 – 16	4
0.04	0.08	4 – 8	3
0.02	0.04	2 – 4	2
0.01	0.02	1 – 2	1
0.005	0.01	0.5 – 1	0.9
0.0025	0.005	0.25 – 0.5	0.8

Figura 7.4: Código de limpieza según normas ISO 4406

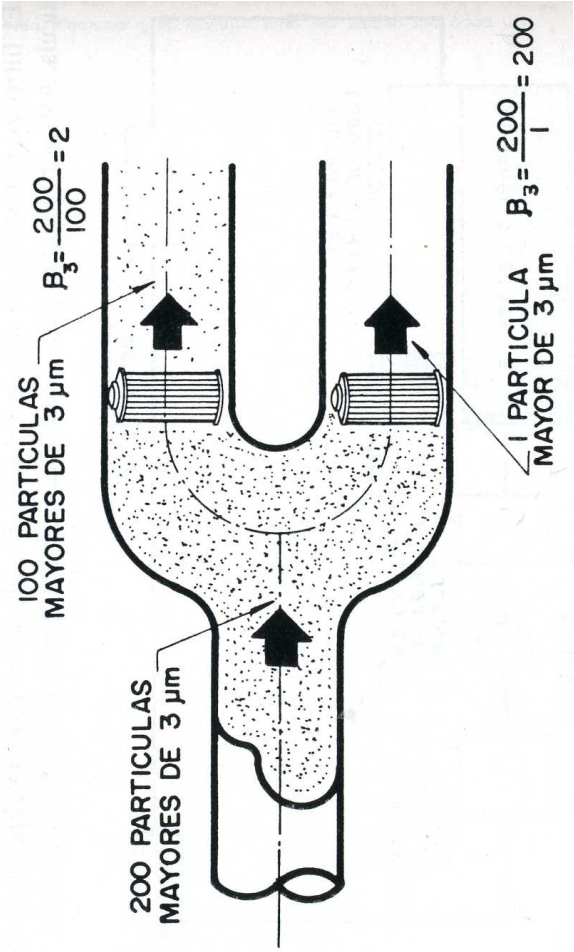


Figura 7.5: Ejemplo filtro beta

7.7. Objetivos de limpieza

La idea es establecer un procedimiento que en el tiempo se traduzca en un camino hacia el mejoramiento contínuo. Un procedimiento propuesto en la literatura para establecer este objetivo final se puede rsumir de la siguiente forma:

- Establecer los objetivos para cada aceite lubricante y fluído hidráulico
- Usar recomendaciones de los fabricantes como valor de referencia para comenzar
- establecer objetivos de extensión de vida más restrictivo cada vez
- Considerar en ello el diseño de la maquinaria, su aplicación y sus influencias en la operación de la planta
- Propóngase esto como una condición personal para asegurar su consecución. Los fabricantes y/o proveedores de equipos no pagan sus fallas.

Como ejemplo se podría establecer el siguiente criterio:

16/13	Manual de servicio (especificaciones del fabricante)
14/11	Metas de confiabilidad
13/10	Metas de seguridad
12/9	Severidad ambiental

Cuadro 7.2: Procedencias de metales en un lubricante

METAL	**ORIGEN**
Aluminio Al	Cojinetes planos, pistones Algunos tipos de jaulas de rodamientos Contaminación externa co polvo ambiental
Antimonio Sb	Aleaciones de cojinetes grasas lubricantes
Bario Ba	aditivos detergentes fugas del circuito de refrigerante
Boro B	aditivo del lubricante trazas del inhibidor del refrigerante (tetraborato de sodio) polvo ambiental
Calcio Ca	aditivo detergente del lubricante
Cobre Cu	cojinetes (Cu-Pb y Sn-Cu) entrada de fluido refrigerante engriadores del lubricante
Cromo Cr	anillos, camisas, pistones acero de válvulas inhibidores de la corrosión (cromato de sodio o de potasio)
Estaño Sn	Cojinetes (Pb-Sn, Cu-Sn, Al-Sn) conductos de lubricantes Sellos y restos de soldadura
Fósforo P	Aditivo antidesgaste y antioxidante del lubricante Fuga de agua de refrigerante
Hierro Fe	segmentos y camisas de cilindros levas y balancines engranajes y cadenas apoyos y muñequillas del cigueñal
Magnesio Mg	aditivos detergentes del lubricante entrada de agua de maar
Manganeso Mn	válvulas sistemas de admisión y escape
Molibdeno Mo	Pistones y segmentos aditivs antifricción de grasa y lubricantes (MoS_2)
Niquel Ni	cilindros elementos de la distribución álabes de turbina

Cuadro 7.3: (continuacion.....) Procedencias de metales en un lubricante

METAL	**ORIGEN**
Plata Ag	Recubrimiento de cojinetes
	dientes de engranajes con recubrimiento antifricción
Plomo Pb	cojinetes
	aditivos del lubricante
	trazas de contaminación por gasolina
	restos de pintura
Silicio Si	polvo atmosférico
	camisas de fundición
	aditivos antiespumantes del lubricante
	inhibidores de corrosión del agua e refrigeración
	restos de pastas de juntas y tubos (siliconas)

Cuadro 7.4: Recomendaciones

Máquina	Código ISO
Rodamiento de bolas	15/13/11
Rodamientos de rodillos	16/14/12
Cojinetes lisos	17/15/12
Caja engranajes industrial	17/15/12
Caja engranajes móvil	17/16/13
Motor Diesel	17/16/13
Turbina de vapor	18/15/12
Máquina de papel	19/16/13

Cuadro 7.5: Fuentes potenciales de elementos contaminantes

Hierro	**Aluminio**	**Silicio**	**Cobre**
Acero	Polvo de camino	Polvo de camino	Adit. antidesgaste
Hierro fundido	Metal de rodam.	Sellador	Bronce
Herrumbre	Pintura	adit. antiespumante	Latón
Partículas de desgaste	Abrasivos	Aleación de aceros	Jaulas de rodamiento
Cascarillas de molienda	Plantas de Aluminio	lubricante sintético	Enfriadores
Polvo mineral	Contam. de carbón	Frenos húmedos	Minas de cobre
Cenizas	Cenizas	Fabric. de vidrio	Pintura
Pintura	Polvo de fundición	Adit. refrigerante	Babbit
Polvo mineral	Alúmina activada	Polvo de fundición	
Cenizas	Bauxita	Fibras de filtros	**Molibdeno**
Pintura	Granito	Cenizas	Aditivo EP
Polvo de papelera	Catalizador	Escorias	Aleac. de metal
Asbestos		Mica	Anillos
Talco	**Cromo**	asbestos	
Zeolita	Revestim. anillos	Polvo de cemento	**Estaño**
Detergente limpiador	Pinturas	granito	Jaulas de rodam.
	Acero inoxidable	cenizas	(bronce)
Níquel		Talco	Soldadura
Aleación acero inox.	**Plata**		Babbit
Cromado	Acabado de cojin.	**Vanadio**	
Estelita (Co-Ni)	Soldadura	Aspas de turbinas	**Cadmio**
Aleac. aceros duros	Algunos rod. agujas	Válvulas	Cojinetes
			recubrimientos
Calcio	**Sodio**	**Boro**	
Agua dura	Inhib. en refrig.	Aditivo EP	**Zinc**
Agua salada	Agua de mar	Agente limpieza	Adit. antidesgaste
Adit. aceite motor	Algunos aditivos	Acido bórico	Bronce
Polvo de minas	Grasa	Detergentes	Cromado
Grasa	Aceite base		Galvanizado
Caliza	Tierra	**Potasio**	
Escoria	Polvo de camino	Inhib. refrigerante	**Plomo**
Hules	Sal	cenizas	Babbit
Tierras Fuller	Ceniza	Polvo de papeleras	Revestim. cojinetes
Lignita	Alúmina activada	Polvo de camino	Adit. de gasolina
Polvo de cemento	Polvo de papelera	Granito	Pintura
Polvo del camino			Soldadura
Gypsun	**Bario**	**Cadmio**	
Inhib. de herrumbre	Adit. aceite motor	cojinetes	
Detergente	Grasa	recubrimientos	

Cuadro 7.6: (continuación)...Fuentes potenciales de elementos contaminantes

Fósforo	**Titanio**	**Magnesio**
Adit. antidesgaste	Rod. turbina a gas	Agua dura
Adit. EP	Pinturas	Adit. aceite motor
Acabado en superf.	Aspas de turbinas	metalurg. turbinas
de engranes	Cadmio	agua salada
	cojinetes	Tiierras Fuller
		Polvo de camino

Cuadro 7.7: Rangos aceptables de cantidad de partículas contaminantes en máquinas usadas en la industria

Máquina	Fe	Cr	Al	Pb	Cu	Si
Motores Diesel	3-150	0-20	2-20	3-50	5-65	1-15
Motores a nafta	25-300	2-25	2-40	10-75	10-80	1-15
Motores a gas natural 2 tiempos	1-40	0-4	0-10	0-20	2-30	0-9
Motor gas natural 4 tiempos	5-80	0-19	1-20	3-40	3-50	1-15
Hidráulicos de equipo fuera carretera	1-20	0-9	1-10	1-15	2-20	1-15
Mandos finales	25-300	0-9	1-10	10-75	10-200	5-45
Diferenciales	50-600	2-20	1-40	10-100	15-250	5-65
Transmisiones de potencia automática	10-100	0-10	3-50	10-350	10-350	5-90
Transmisión manual	30-400	2-15	1-40	10-75	15-100	5-50
Componente de tornillo rotatorio	3-30	0-4	0-4	0-20	3-39	0-14
Aire acondicionado centrífugo	0-20	0-1	0-1	0-40	0-30	0-3
Turbinas a gas	0-20	0-4	0-3	0-3	0-15	0-5
Engranajes industriales	3-150	0-4	1-20	3-40	10-80	5-65
Hidráulicos industriales	0-10	0-1	0-2	0-10	0-10	0-10

Cuadro 7.8: Recomendaciones de filtrado para maquinaria diversa

Maquinaria	Valor de β
Rodamientos de bolas radiales y de empuje	$\beta_{1a3} = 200$
Rod. rodillos radiales y de empuje	$\beta_{1a6} = 200$
Cojinetes lisos (turbinas)	$\beta_3 = 200$
Cojinetes lisos (rodillos de laminación)	$\beta_6 = 200$
Reductores de velocidad	$\beta_{3a12} = 200$

Cuadro 7.9: Daño causado por la contaminación

Contaminante	Cambios en la química del aceite	Cambios en las prop. físicas del aceite	Químicamente atacan la superficie de la maquinaria	Mecánicamente destruyen la superficie de la maquinaria
Sólidos	Oxidación Agotamiento de aditivos	Efectos de la viscosidad	Barniz adherente	Abrasión Fatiga de la superficie
Agua	Oxidación Agotamiento aditivos	Efectos de la viscosidad	Destrucción ácida Herrumbre	Cavitación Rayado
Combustible	Agotamiento aditivos Aromáticos	Bajo punto inflamación Baja viscosidad Incremento de presión de vapor	Acido sulfúrico	Pérdida de la resistencia de película
Glicol (anticongelante)	Oxidación Lodo	Incremento de la viscosidad	Herrumbre y Corrosión	Pérdida de la resistencia de película
Aire	Oxidación	Oxidación	Incremento de la acidez	Cavitación
Calor	Degradación térmica Oxidación	Incremento de la viscosidad	Barniz Acidez	Pérdida de la resistencia de película

New Cleanliness Level (ISO Code)

Current Machine Cleanliness (ISO Code)	20/17	19/16	18/15	17/14	16/13	15/12	14/11	13/10	12/9	11/8	10/7
26/23	5 3 4 2.5	7 3.5 4.5 3	9 4 6 3.5	>10 5 6.5 4	>10 6 7.5 5	>10 7.5 8.5 6.5	>10 9 10 7	>10 >10 >10 9	>10 >10 >10 10	>10 >10 >10 >10	>10 >10 >10 >10
25/22	4 2.5 3 2	5 3 3.5 2.5	7 3.5 4.5 3	9 4 5 3.5	>10 5 6.5 4	>10 6 8 5	>10 7 9 6	>10 9 10 7.5	>10 >10 >10 9	>10 >10 >10 >10	>10 >10 >10 >10
24/21	3 2 2.5 1.5	4 2.5 3 2	6 3 4 2.5	7 4 5 3	9 5 6.5 4	>10 6 7.5 5	>10 7 8.5 6	>10 8 9.5 7	>10 10 >10 8	>10 >10 >10 10	>10 >10 >10 >10
23/20	2 1.5 1.7 1.3	3 2 2.3 1.5	4 2.5 3 2	5 3 3.7 2.5	7 3.5 5 3	9 4 6 3.5	>10 5 7 4	>10 6 8 5	>10 8 10 6.5	>10 9 >10 8.5	>10 >10 >10 10
22/19	1.6 1.3 1.4 1.1	2 1.6 1.8 1.3	3 2 2.3 1.7	4 2.5 3 2	5 3 3.5 2.5	7 3.5 4.5 3	8 4 5.5 3.5	>10 5 7 4	>10 6 8 5	>10 7 10 5.5	>10 >10 >10 8.5
21/18	1.3 1.2 1.2 1.1	1.5 1.5 1.5 1.3	2 1.7 1.8 1.4	3 2 2.2 1.6	4 2.5 3 2	5 3 3.5 2.5	7 3.5 4.5 3	9 4 5 3.5	>10 5 7 4	>10 7 9 5.5	>10 10 10 8
20/17		1.3 1.2 1.2 1.05	1.6 1.5 1.5 1.3	2 1.7 1.8 1.4	3 2 2.3 1.7	4 2.5 3 2	5 3 3.5 2.5	7 4 5 3	9 5 6 4	>10 7 8 5.5	>10 9 10 7
19/16			1.3 1.2 1.2 1.1	1.6 1.5 1.5 1.3	2 1.7 1.8 1.5	3 2 2.2 1.7	4 2.5 3 2	5 3 3.5 2.5	7 4 5 3.5	9 6 7 4.5	>10 8 9 6
18/15				1.3 1.2 1.2 1.1	1.6 1.5 1.5 1.3	2 1.7 1.8 1.5	3 2 2.3 1.7	4 2.5 3 2	5 3 3.5 2.5	7 4.5 5.5 3.7	>10 6 8 5
17/14					1.3 1.2 1.2 1.1	1.6 1.5 1.5 1.3	2 1.7 1.8 1.5	3 2 2.3 1.7	4 2.5 3 2	6 3 4 2.5	8 5 6 3.5
16/13	Hydraulics and Diesel Engines	Rolling Element Bearings				1.3 1.2 1.2 1.1	1.6 1.5 1.5 1.3	2 1.7 1.8 1.5	3 2 2.3 1.8	4 3.5 3.7 3	6 4 4.5 3.5
15/12							1.3 1.2 1.2 1.1	1.6 1.5 1.5 1.4	2 1.7 1.8 1.5	3 2 2.3 1.8	4 2.5 3 2.2
14/11	Journal Bearings and Turbo Machinery	Gear Boxes and Other						1.3 1.3 1.3 1.2	1.6 1.6 1.6 1.4	2 1.8 1.9 1.5	3 2 2.3 1.8
13/10									1.4 1.2 1.2 1.1	1.8 1.5 1.6 1.3	2.5 1.8 2 1.6

Figura 7.6: Tabla de extensión de vida asociada a códigos de limpieza para diversos tipos de máquinas

Factor de Penalización por Confiabilidad (FPC)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	19/16/13	18/15/12	17/14/12	16/13/11	15/12/10	14/11/9	13/10/8	12/10/8	11/9/7	10/9/7
9	19/16/13	19/16/13	18/15/12	17/14/11	16/13/10	15/12/10	14/11/9	13/10/8	12/9/7	11/9/7
8	20/17/14	20/17/13	19/16/13	18/15/12	16/13/11	15/12/10	14/11/9	13/10/8	12/9/8	12/9/7
7	20/17/14	20/17/14	19/16/13	18/15/12	17/14/11	16/13/10	15/11/9	14/11/9	13/10/8	12/10/8
6	21/18/15	21/18/14	19/16/13	18/15/12	17/14/11	16/13/10	15/12/9	14/11/9	13/10/8	12/10/8
5	21/18/15	21/18/15	20/17/14	19/16/13	18/15/12	17/14/11	16/14/11	15/13/11	14/11/10	13/11/9
4	22/19/16	22/19/16	20/17/14	19/17/14	18/15/13	17/14/11	16/14/11	15/13/10	14/12/9	13/11/9
3	22/19/16	22/19/16	21/18/15	20/17/14	19/16/13	18/15/12	17/14/11	16/14/11	15/13/10	14/12/9
2	23/20/17	23/20/17	22/19/16	21/18/15	20/17/14	19/16/13	18/15/12	17/14/11	16/14/11	15/13/10
1	24/20/17	23/20/17	22/19/16	21/18/15	20/17/14	19/16/13	19/16/12	18/15/11	17/14/11	16/14/11

Factor de Severidad de Contaminantes (CSF)

Figura 7.7: Tabla de objetivos de limpieza (TOL). CFS representa la sensibilidad de la maquinaria a la falla por contaminantes y FPC representa el factor de penalización en relación al costo, seguridad e interrupción del proceso por falla

Tipo	Características	Aspecto
	DESGASTE ADHESIVO	
Fricción Normal	Forma similar a diminutas *escamas* metálicas, de un tamaño nunca superior a los 20 µm. Su superficie es lisa y no suelen presentar colores de oxidación. Este tipo de partículas está asociado al desgaste normal.	
Fricción Deslizante	Estriaciones paralelas en superficie, generalmente en la dirección de la dimensión mayor. Bordes rectos. Superficie irregular. Coloración superficial por sobrecalentamiento que induce habitualmente colores de oxidación característicos para cada tipo de aleación.	
	DESGASTE POR FATIGA	
Fragmento	Morfología equiaxial, con la superficie sin irregularidades pronunciadas, su relación dimensión mayor frente al grosor es inferior a 10:1 llegando incluso a 5:1. Aparecen como consecuencia de la degradación del material por fatiga por elevadas cargas.	
Esfera	Forma esférica característica que permite una rápida diferenciación, su tamaño suele estar entre los 1 µm y 10 µm de diámetro. Si el diámetro de las esferas es superior a los 20 micrómetros indican un daño grave en la máquina o bien su origen son restos de mecanizado, soldadura o corte con sierras radiales.	
Laminar	Aspecto aplanado sin bordes rectos, con la superficie lisa, en ocasiones presentan agujeros y bordes hendidos, consecuencia del aplastamiento y laminación de los fragmentos de fatiga que se introducen en la zona de rodadura.	
	DESGASTE ABRASIVO	
Entre dos cuerpos	De 2 µm a 5 µm de anchura y una longitud generalmente superior a los 30 µm. Se presentan en forma de virutas de aspecto recto o curvado. En ocasiones toman colores de oxidación	
Entre tres cuerpos	De 1 µm de anchura como máximo y de una longitud inferior a los 30 µm. Suelen ser menos curvadas que las formadas entre dos cuerpos.	
	ÓXIDOS FERROSOS	
Rojos tipo alfa (α-Fe_2O_3)	Tonalidad pardo-rojiza característica, son semitransparentes a la luz transmitida, responden con un color naranja brillante ante la luz polarizada, lo cual permite su fácil identificación. Su presencia es indicativa de una contaminación por agua del circuito de lubricación.	
Rojos tipo beta (β-Fe_2O_3)	Tonalidad grisácea característica, planos, de aspecto similar a las partículas ferrosas de desgaste por deslizamiento, pero con una menor respuesta al campo magnético. Si se observan con los transmitida, las áreas de menos grosor son traslúcidas total o parcialmente, evidenciándose un color marrón-rojizo.	
Negros / Oscuros	Color oscuro generadas por sobrecalentamientos. En la superficie se detectan irisaciones y colores de oxidación severa.	
Corrosión	Son óxidos de un tamaño inferior a 1 micrómetro, al producirse sobre la superficie de los materiales afectados reacciones químicas o electroquímicas, bien por la presencia de gases o líquidos especialmente reactivos, o bien por la aparición de pares galvánicos entre dos materiales distintos.	
	PARTÍCULAS CONTAMINANTES Y DE DEGRADACIÓN DEL ACEITE	
Polímeros de fricción y de degradación.	Los **polímeros de fricción** presentan un aspecto cristalino, son debidos a la degradación del lubricante en zonas de elevadas presiones. Los **polímeros de degradación** presentan un aspecto amorfo, como geles, originados por procesos oxidativos del aceite y catalizados por la presencia de agua, aireación, elevadas temperaturas y partículas metálicas en suspensión.	
Polvo ambiental	Polvo de silicatos: son partículas brillantes, se asemejan a diminutos fragmentos de vidrio. Tienen una elevada dureza, que podría dañar las superficies lubricadas. Polvo calcáreo: partículas traslúcidas con aspecto terroso, en algunas ocasiones presentan brillos, tienen un poder abrasivo inferior a los silicatos.	
Fibras	**Fibras de naturaleza orgánica:** son curvadas, de diferentes colores, con los extremos desgarrados, los tratamientos térmicos las carboniza o funde. **Fibras de naturaleza inorgánica:** *Amianto* son partículas alargadas de un grosor generalmente inferior a 1 µm. *Fibra de vidrio*: son fibras largas y rectas, su grosor es de varios micrómetros.	

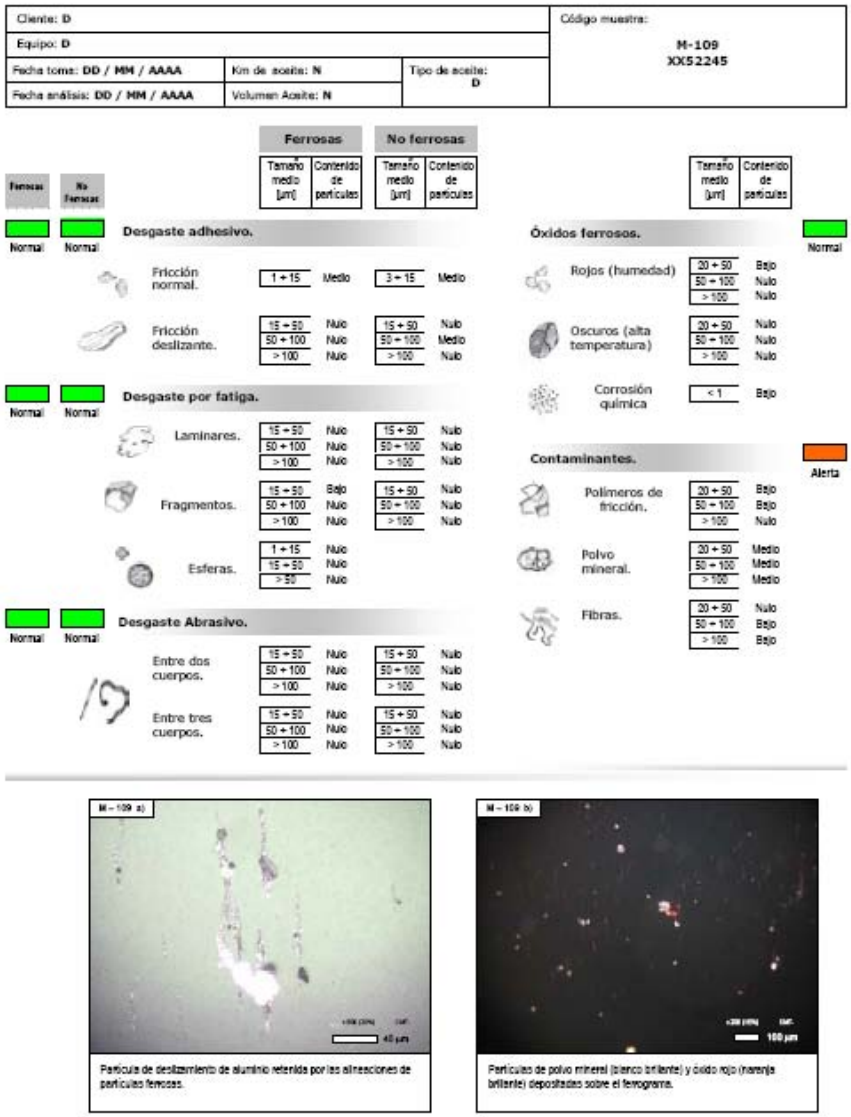
Figura 7.8: Tipos de formas de partículas encontradas en un análisis de aceite

Valoración	Rango de evaluación	Código de color
Normal	$< 3 * (C_1 * C_2 * C_3)$	Verde
Alerta	$\geq 3 * (C_1 * C_2 * C_3)$ y $< 5 * (C_1 * C_2 * C_3)$	Naranja
Alarma	$\geq 5 * (C_1 * C_2 * C_3)$	Rojo

Figura 7.9: Forma de ponderar los criterios de las partículas contaminantes

Tipo de máquina (coeficiente C1)		Tipo de entorno de trabajo (coeficiente C2)		Carga de trabajo de la máquina (coeficiente C3)	
MCIA	1,0	Ambiente normal	1,0	Uso normal, donde el equipo es sometido a cargas de trabajo similares a las de diseño.	1,0
Hidráulicos	1,0				
Turbinas	1,0				
Transmisiones	1,25	Ambiente sucio (canteras, minas, cementeras, obras públicas)	1,25	Uso en solicitaciones extremas por encima de la carga normal de diseño del equipo.	1,25
Reductores	1,25				

Figura 7.10: Forma de clasificar las partículas contaminantes



Cliente: D			Código muestra: M-109 XX52245
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

	Ferrosas Tamaño medio [µm]	Ferrosas Contenido de partículas	No ferrosas Tamaño medio [µm]	No ferrosas Contenido de partículas
Desgaste adhesivo. (Ferrosas: Normal; No ferrosas: Normal)				
Fricción normal.	1 ÷ 15	Medio	3 ÷ 15	Medio
Fricción deslizante.	15 ÷ 50	Nulo	15 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Nulo	50 ÷ 100	Medio
	> 100	Nulo	> 100	Nulo
Desgaste por fatiga. (Ferrosas: Normal; No ferrosas: Normal)				
Laminares.	15 ÷ 50	Nulo	15 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Nulo	50 ÷ 100	Nulo
	> 100	Nulo	> 100	Nulo
Fragmentos.	15 ÷ 50	Bajo	15 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Nulo	50 ÷ 100	Nulo
	> 100	Nulo	> 100	Nulo
Esferas.	1 ÷ 15	Nulo		
	15 ÷ 50	Nulo		
	> 50	Nulo		
Desgaste Abrasivo. (Ferrosas: Normal; No ferrosas: Normal)				
Entre dos cuerpos.	15 ÷ 50	Nulo	15 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Nulo	50 ÷ 100	Nulo
	> 100	Nulo	> 100	Nulo
Entre tres cuerpos.	15 ÷ 50	Nulo	15 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Nulo	50 ÷ 100	Nulo
	> 100	Nulo	> 100	Nulo

	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Óxidos ferrosos. (Normal)		
Rojos (humedad)	20 ÷ 50	Bajo
	50 ÷ 100	Nulo
	> 100	Nulo
Oscuros (alta temperatura)	20 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Nulo
	> 100	Nulo
Corrosión química	< 1	Bajo
Contaminantes. (Alerta)		
Polímeros de fricción.	20 ÷ 50	Bajo
	50 ÷ 100	Bajo
	> 100	Nulo
Polvo mineral.	20 ÷ 50	Medio
	50 ÷ 100	Medio
	> 100	Medio
Fibras.	20 ÷ 50	Nulo
	50 ÷ 100	Bajo
	> 100	Bajo

M – 109 a)

Partícula de deslizamiento de aluminio retenida por las alineaciones de partículas ferrosas.

M – 109 b)

Partículas de polvo mineral (blanco brillante) y óxido rojo (naranja brillante) depositadas sobre el ferrograma.

Figura 7.11: Ejemplo de evaluación respecto a la forma de las partículas contaminantes

Tabla 7.7. Transmisiones

Metal	Posible fuente	Normal	Marginal	ppm/500 hrs Precaución	crítico
Fierro	Engranes, rodamientos, separadores	0 - 60	61 - 100	101 - 180	> 180
Cromo	Rodamientos	0 - 2	3 - 6	7 - 10	> 10
Plomo	Arandela, discos fricción	0 - 8	9 - 15	16 - 20	> 20
Cobre	Arandelas, discos de fricción	0 - 70	71 - 120	121 - 200	> 200
Estaño	Arandela de empuje	0 - 6	7 - 12	13 - 18	> 18
Aluminio	Tierra, convertidor, estator/impulsor	0 - 4	5 - 10	11 - 15	> 15
Silicio	Tierra, antiespumante	0 - 20	21 - 30	31 - 40	> 40
Sodio	Sal, posiblemente aditivos	0 - 30	31 - 50	51 - 80	> 80

Tabla 7.10. Hidráulicos

Metal	Posible fuente	Normal	Marginal	ppm/500 hrs Precaución	crítico
Fierro	Engranes, válvulas	0 - 8	9 - 15	16 - 25	> 25
Cromo	Cilindros, ejes	0 - 3	4 - 8	9 - 15	> 15
Plomo	Rodam. de bombas	0 - 4	5 - 10	11 - 15	> 15
Cobre	Rod. y plato de bomba	0 - 8	9 - 15	16 - 25	> 25
Estaño	Usualmente no presente	-	-	-	-
Aluminio	Tierra. carcaza de bomba	0 - 3	4 - 8	9 - 15	> 15
Silicio	Tierra	0 - 5	6 - 10	11 - 20	> 20
Sodio	Sal, posiblem. aditiv.	0 - 30	31 - 50	51 - 80	> 80

7.8. Material de discusión

100 200 300 400 µm
50 100 150 200 µm
50 100 150 200 µm
25 50 75 100 µm
50 100 150 200 µm

Figura 7.12:

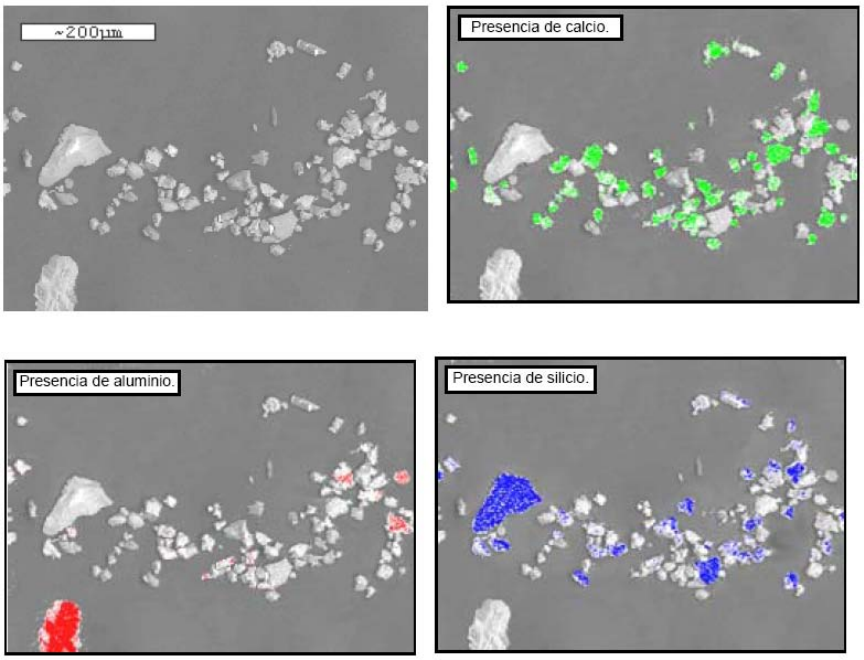


Figura 7.13: Barrido global sobre una muestra para determinar la presencia de Calcio, Aluminio y Silicio en las partículas de polvo

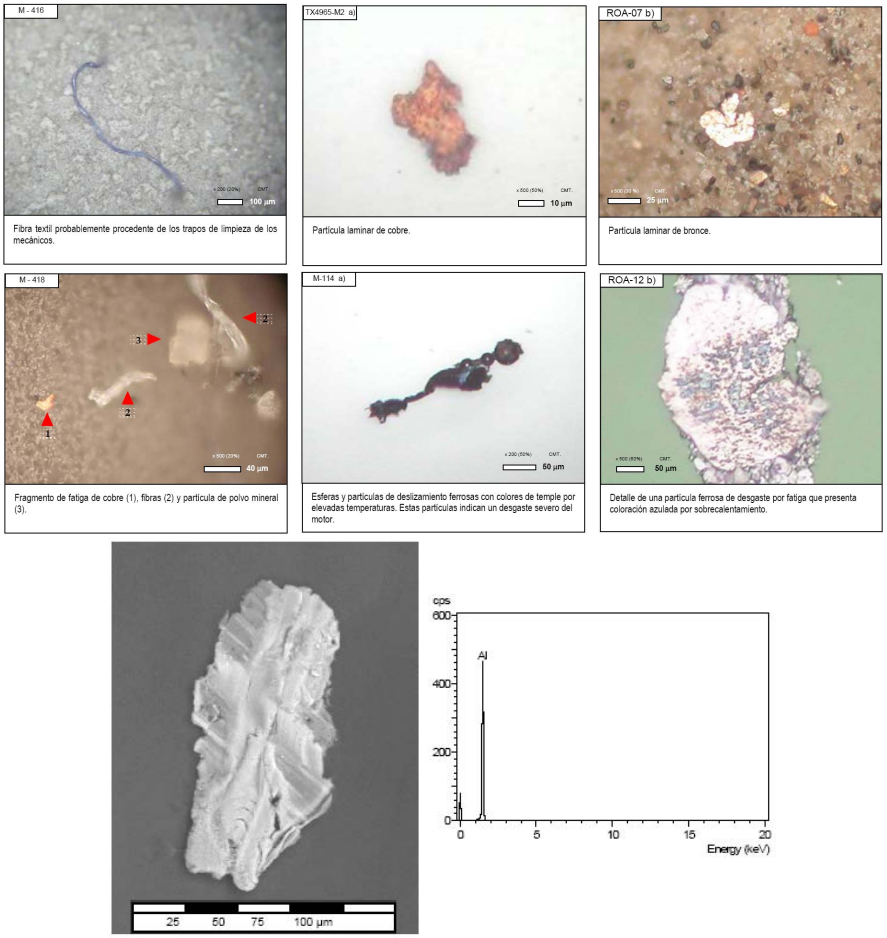


Figura 7.14: Ejemplos variados de contaminación en lubricantes

Cuadro 7.10: Frecuencias recomendadas en muestreo de aceites

Tipo de máquina	Horas
Motores Diesel fuera de carretera	150
Transmisiones, diferenciales, mandos finales	300
hidráulicos equipos móviles	200
Turbina de gas industrial	500
Compresores Aire/Gas	500
Enfriadores	500
Cajas de engranajes alta velocidad/carga	300
Cajas de engranajes baja velocidad/carga	1000
Cojinetes planos y rodamientos	500
Motores de aviación	25 - 50
Turbina de gas de aviación	100
Cajas de engranajes de aviación	100 - 200
Hidráulicos de aviación	100 - 200

Cuadro 7.11: Identificación de Problemas en máquinas

Problema	**Efectos**	**Síntomas**
Lubricante equivocado	Cambios en la viscosidad Cambios en IV Cambios en punto inflamación Cambio en aditivos Cambios en el espectro FTIR Cambios en el TAN / TBN Cambio en patrones de desgaste	Cambio en tº de descansos Desgaste en descansos Ruido en descansos Giro forzado
Agotamiento aditivos	Decremento del TAN, vida de oxidación RBOT, contenido de Zinc/Pósforo. Incremento de vicosidad, en el TAN conteo de partículas FTIR: decremento de aditivos, incremento de oxidación, sulfatación y/o nitruración	Oscurecimiento del aceite Olor desagradable Calentamiento excesivo
Falla de dispersantes	FTIR o bajo TBN Incremento conteo partículas insolubles en pentano Punto central definido en el papel secante	Inspección de filtros lodo en el filtro, condición de alivio en filtro Humo negro en escape Depósitos en anillos y válvulas.
Deterioro aceite básico	Incremento viscosidad, TAN, conteo partículas, y/o partículas ferrosas Decremento TBN Cambio IV y baja resistencia dieléctrica	 Pobre separación agua/aceite Aire atrapado/espumación Mal olor, formación lodo/barniz Prueba papel filtro amarilla. café oscurecimiento del aceite

Problema	**Efectos**	**Síntomas**
Contaminación con agua	Incremento de viscosidad, TAN, Ca, Mg y/o Na Degradación o falla rápida de aditivos Prueba de crujido, VISA, KF, FTIR Reducción rigidez dieléctrica Prueba de papel filtro: Periferia externa al punto central afilada o forma de estrella	Aceite nebuloso, opaco, agua batida / separada, formación de lodos Evidencia de desgaste: corrosión Filtros: Papel ondulado, alta caída de presión, vida reducida. Ferrograma muestra herrumbre Atascamiento de válvulas, taponeamiento de orificios desgaste de descansos, falla, bombas/descansos ruidosos
Contaminación con anti-congelante	Incremento en la viscosidad, Cu, conteo de partículas, metales de desgaste, Na, B y/o K FTIR: glicol Prueba de crujido, VISA, KF	Cojinetes de color carbón oscuro y desgaste Falla de dispersantes: lodo, barniz. Prueba de papel filtro: El filtro se taponea prematuramente, el aceite tiene una consistencia como de mayonesa, humo blanco en el escape

Problema	**Efectos**	**Síntomas**
Dilución por combustible	Baja viscosidad del aceite, bajo punto de inflamación Dilución de metales de desgaste (análisis de elementos) FTIR / cromatografía de gases para combustible Aumento conteo partículas y rebabas	Aumento de niveles de aceite y de su tº Prueba de papel filtro: halo alrededor de la mancha central Humo de escape azul (anillos atascados), filtro de aire tapado inyectores defectuosos Aceite con olor a Diesel, condiciones de sobrealimentación de diesel
Aire atrapado	Incremento en la viscosidad, TAN, agua, y/o FTIR para oidación Antiespumante de Si muy altos o bajos Prueba de papel filtro: carbón coquizado en la menbrana	Aceite nebuloso / espumación, incremento temperatura del aceite Sistema oleohidraulico esponjosos, lentos, operación ruidosa
Condiciones de desgaste abrasivo	Incremento de Si, Al, conteo de partículas y partículas ferrosas Contaminación con agua Ferrograma muestra desgaste por corte y partículas de sílica	Superficies marcadas con rayas o pulidas Desgaste de corte en prueba de papel filtro o en el filtro Falla del sello del filtro o respiradero

Problema	**Efectos**	**Síntomas**
Condiciones de desgaste corrosivo	Incrementoen el TAN, conteo de partículas, hierro, espectrográfico y metales de cojinetes, agua.	Picado, corrosión en las superficies de contacto
	Disminución del TBN	Conductividad eléctrica, alta fuga de gases en motores
	El ferrograma muestra partículas de desgaste sub-micrón, partículas de herrumbre, óxidos metálicos	Herrumbre en la membrana o en el papel filtro
Fallo del filtro	Incremento de Si, Al, conteo partículas, partículas ferrosas y/o hierro elemental	Atascamiento de válvulas, rodamientos ruidosos
	El ferrogram muestra partículas verdosas, desgaste por corte y fibras en los filtros	Presión incremental en los filtros alta o sin cambio Fallo frecuente de descansos, altos niveles de sedimentos en el fondo
Sobrecalentamiento	Incremento de partículas férricas, conteo de partículas, punto de inflamación, viscosidad o gravedad específica.	Falla en rodamientos
	Los ferrogramas muestran polímeros de fricción, óxidos, partículas templadas o azuladas, partículas de desgaste deslizante, partículas de rodamientos.	Puntos calientes (alta temperatura) de Rodamientos
		Evidencia de lodos o carbonización. Aceite con olor a quemado, rancio. Alta t^{o} en aceite

Problema	**Efectos**	**Síntomas**
Desalineamiento Desbalanceamiento Sobrecarga	Los ferrogramas densamente cargados con óxidos de hierro negro, óxidos metálicos oscuros, desgaste de corte y deslizantes severos, partículas templadas, pedazos de partículas, partículas de rodamientos, o metales de cojinetes Incremento en viscosidad, TAN, conteo de partículas, y/o partículas férricas Agotamiento de Zn y P	Incremento en t^{o} del aceite, metales de rodamientos o camisas de motor Aceite oscuro, mal olor, fallas de rod. y cojinetes, giro dificultuoso del eje, ruido y vibración anormal, Prueba de papel filtro: Carbón, chispas de metal, Chispas de metal en filtro, detectores de rebaba altamente saturadas.
Inicio de falla en rodamientos, engranajes, bombas	Incremento exponencial en el de partículas y el número de concentración de partículas de desgaste Incremento de hierro y metales de los rodamientos El ferrograma muestra incremento en partículas esféricas, óxidos metálicos oscuros, partículas azuladas, partículas de deslizamiento severo, desgarramientos, desgaste por corte	Oscilación del eje, vibración, cambios acústicos, humo de escape azul, puntos calientes, giro eje forzado, altas t^{o}s en rodamientos. Prueba de papel filtro con muestras de carbonización

Cuadro 7.12: Selección viscosidad aceite motoreductores

Temperatura ambiente		**Grado ISO** **Velocidad en** (rpm) **eje de salida**		
$\geq$	hasta	13.5 - 500	501 - 1000	1001 - 3000
0	10	68	46	32
10	20	100	68	46
20	30	150	100	68
30	40	220	150	100
40		460	320	220

Cuadro 7.13: Detección de agotamiento de aditivos

ADITIVOS	METODO MONITOREO	EFICIENCIA
ZDDP (antioxidante, antidesgaste e inhibidor de corrosión	FTIR (a número de onda g50)	Aceptable (detección temprana)
	FTIR oxidación (1750)	Bueno (detección tardía)
	RBOT	Excelente (detección temprana)
	TAN (tendencia negativa)	Aceptable (detección temprana)
	TAN (tendencia positiva)	Bueno (detección tardía)
	Voltmetría	Excelente (detección temprana)
	Espectroscopia de elementos	Excelente (detección temprana)
Inhibidores de corrosión	Espectroscopía de elementos	Aceptable (detección temprana)
Inhibidores de espuma	Espectroscopía de elementos	Aceptable (interferencias con la suciedad)
Azufre fósforo EP	Espectroscopía de elementos	Excelente
Disulfuro de Molibdeno	Espectroscopía de elementos	Bueno
Boratos EP	Espectroscopía de elementos	Excelente
Mejoradores del IV	Viscosidad a 40ºC y a 100ºC	Excelente
Dispersantes	Prueba de la gota	Bueno
Detergentes	TBN	Excelente
	Espectroscopía de elementos	Excelente
Antioxidante	FTIR	fAceptable

	Motor	Transmisión	Diferencial	Transmisión final
Aluminio (Al)	Pistones, Cojinetes, Bloques, Cárter, Bujes, Ventiladores, Cojinetes de empuje	Bombas, Embrague, Arandelas de empuje, Bujes, Impulsor del convertidor de par	Arandelas de empuje, Bujes de bomba	Bomba de aceite, Arandelas de empuje
Cadmio (Cd)	Cojinetes de apoyo			
Cromo (Cr)	Segmentos, Cojinetes de rodillos/ rodillos cónicos, Camisas, Válvulas de escape	Cojinetes de rodillos/rodillos cónicos	Cojinetes de rodillos/rodillos cónicos	Cojinetes de rodillos/rodillos cónicos
Cobre (Cu)	Bujes de bulón, Cojinetes, Bujes de leva, Enfriador de aceite, Bujes de tren de válvulas, Arandelas de empuje, Regulador, Bomba de aceite	Embragues, Discos de dirección, Bujes, Arandelas de empuje, Enfriador de aceite	Bujes, Arandelas de empuje	Bujes, Arandelas de empuje
Hierro (Fe)	Cilindros, Bloque, Engranajes, Cigüeñal, Bulones, Segmentos, Árbol de levas, Tren de válvulas, Forros de bomba de aceite, Óxido	Engranajes, Discos, Carcasas, Cojinetes, Bandas de freno, Carretes del cambio, Bombas, Tomas de fuerza	Engranajes, Tomas de fuerza, Árboles, Cojinetes, Carcasas	Engranajes, Cojinetes, Árbol, Carcasa
Plomo (Pb)	Cojinetes			
Plata (Ag)	Cojinetes, Buje de bulón (EMD)	Cojinetes	Cojinetes	Cojinetes
Estaño (Sn)	Pistones, Revestimiento de cojinetes, Bujes			
Titanio (Ti)				

Figura 7.15: Presencia de metales comunes en la maquinaria industrial

	Motor de gas natural/biogás	Turbina (gas/ vapor)	Hidráulico/ recirculación	Compresor	Transmisión	Aceites para máquinas de papel
Aluminio (Al)	Pistones, Cojinetes, Bloques, Cárter, Bujes, Ventiladores, Cojinetes de empuje		Carcasa del motor de la bomba, prensaestopas de cilindros	Rotores, Pistones, Cojinetes, Arandelas de empuje, Cárter del bloque	Arandelas de empuje, Bomba de aceite, Bujes	
Cadmio (Cd)						
Cromo (Cr)	Segmentos, Cojinetes de rodillos/rodillos cónicos, Camisas, Escape, Válvulas		Piedras, Carretes, Cojinetes de rodillos/ rodillos cónicos	Segmentos, Cojinetes de rodillos/rodillos cónicos	Cojinetes de rodillos/ rodillos cónicos	Cojinetes
Cobre (Cu)	Bujes de bulón, Cojinetes, Bujes de leva, Enfriador de aceite, Bujes de tren de válvulas, Arandelas de empuje, Regulador, Bomba de aceite	Cojinetes, Enfriador de aceite	Arandelas de empuje de bombas, Pistones de bombas, Prensaestopas de cilindros, Guías, Buje, Enfriador de aceite	Placas de desgaste, Bujes, Bujes de bulón, Cojinetes (recip.), Arandelas de empuje	Arandelas de empuje, Bujes, Enfriador de aceite	Jaulas de cojinete, Bujes, Enfriador de aceite
Hierro (Fe)	Cilindros, Bloque, Engranajes, Cigüeñal, Bulones, Segmentos, Árbol de levas, Tren de válvulas, Forros de bomba de aceite	Cojinetes	Paletas de bomba, Engranajes, Pistones, Diámetro interior de cilindros, Bielas, Cojinetes, Carcasas de bomba	Árbol de levas, Bloque, Cárter, Cojinetes, Árboles, Bomba de aceite, Segmentos, Cilindros	Engranajes, Cojinetes, Árbol	Cojinetes, Engranajes, Cárter
Plomo (Pb)	Cojinetes	Cojinetes	Cojinetes	Cojinetes		Cojinetes
Plata (Ag)	Cojinetes	Cojinetes	Cojinetes	Cojinetes	Cojinetes	
Estaño (Sn)	Pistones, Cojinete, Bujes	Cojinetes	Cojinetes	Pistones, Cojinete, Bujes		Cojinetes
Titanio (Ti)		Cojinetes, Álabes de turbina				

Figura 7.16: Presencia de metales comunes en la maquinaria industrial

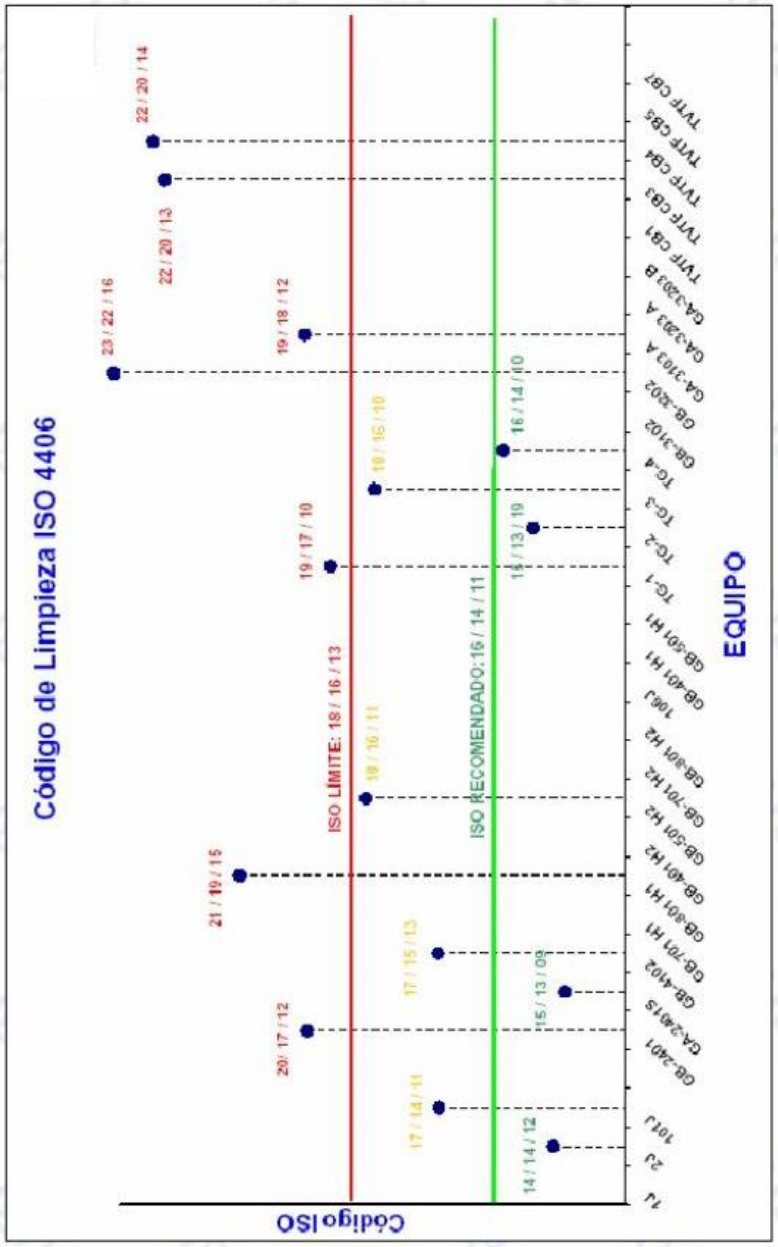


Figura 7.17: Ejemplo de registro de maquinaria en una industria para controlar la limpieza según normas ISO

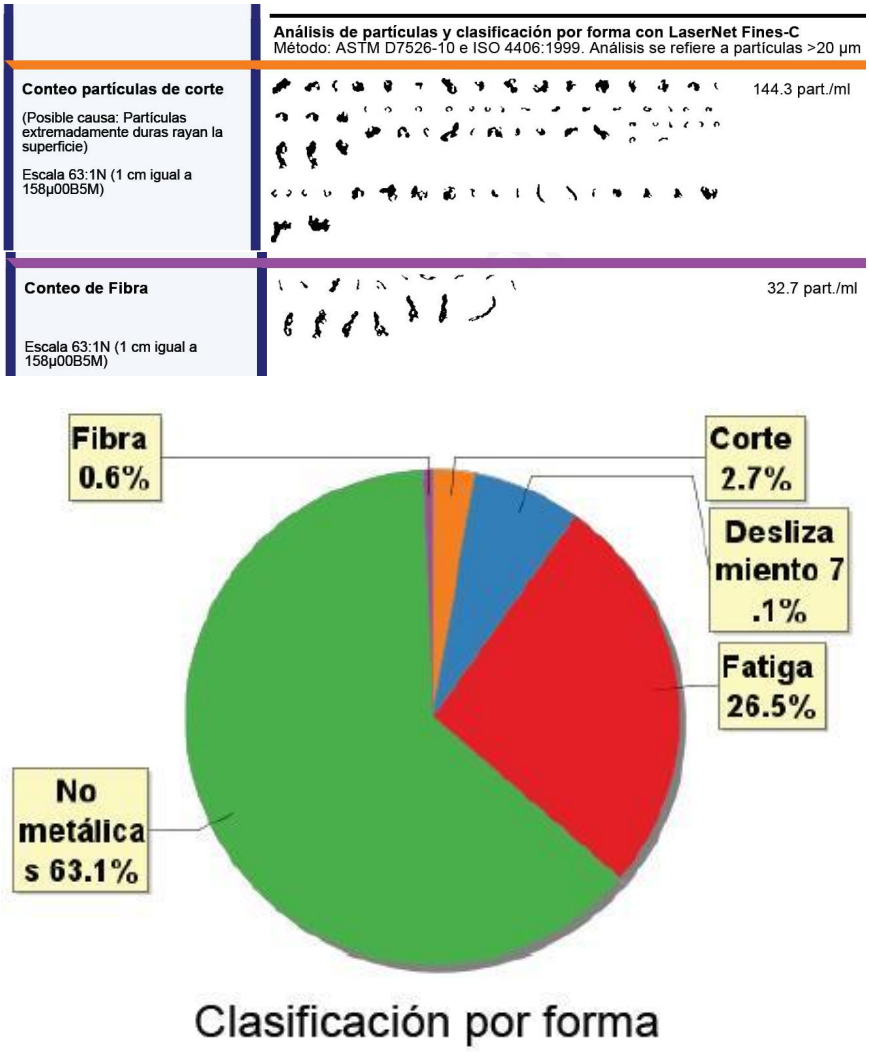


Figura 7.18: Información extraída de un informe de análisis de aceite que incluye forma de las partículas

Cuadro 7.14: Detección de agotamiento de aditivos

SUSTANCIA ACTIVA	COMPUESTOS CARACTERISTICOS	FUNCION
Aditivos para extremas presiones	Compuestos orgánicos de azufre, fósforo y nitrógeno	Mejora de la capacidad de absorción de cargas mediante la formación de capas tribológicas de reacción y mejora de la protección contra microsoldaduras
Aditivos reductores de desgaste	Compuestos orgánicos de fósforo, nitrógeno y azufre, dialquilditiofosfato	Reducción del desgaste en el régimen de fricción mixta mediante la formación de capas de reacción
Aditivos reductores del coeficiente de fricción	Aceites grasos, derivados de aceite graso, compuestos de fósforo, PTFE	Reducción de péridas por fricción, inhibición de deslizamiento a sacudidas (stick-slip) y de ruidos mediante la adsorción de sustancias activas polares en la superficie metálica
Inhibidores de la corrosión	Sulfonatos metálicos, aminoderivados, ácidos carboxílicos, dialquil-quilditiofosfatos de cinc	Protección contra el ataque agresivo en ,materiales metálicos incluso en presencia de agua; neutralización de productos de envejecimiento ácidos
Inhibidores de envejecimiento (antioxidantes)	Derivados de fenol, aminas aromáticas alki-ladas, dialquilditiofos-fato de cinc	Retardan la descomposición por oxidación, reducen la formación de lodo y lacas
Lubricantes sólidos	Grafito, MoS_2, PTFE óxidos y fosfatos, talco	Mejora de la capacidad de absorción de cargas, reducción de la tribocorrosión y de la tendencia al deslizamientoa sacudidas (stick-slip)
Mejorardor de la adherencia	Polisobutilenos, polímeros de alefina, latex	Mejora la adherencia del lubricante en la superficie

Bibliografía

[1] Neale Michael J., *The tribology handbook*, Ed. Butterworth Heinemann, Segunda Edición, (2001)

[2] Stachowiak G.W., Batchelor A.W. , *Engineering tribology*, Butterworth - Heinemann (2001)

[3] Brandlein J., Eschmann P., Hasbargen L., Weigand K. *Ball and Roller Bearing. Theory, Design and Applicatrions* Third Edition, John Wiley Sons, (1999)

[4] Norton R. L.*Diseño de máquinas* Ed. Prentice Hall Inc. México, (1988)

[5] shigley J. E. - Mischke Ch. R.*Diseño en Ingeniería Mecánica* Ed. Mc Graw Hill, Sexta Edición, México, (1990)

[6] SKF Group Corporation, *Catálogo General*, Suecia, (2006)

[7] Schaeffler Group Industrial, *Catálogo General de Rodamientos FAG*, Suecia, (2009)

[8] TIMKEN Group Corporation, *Manual Técnico*, Argentina, (1988)

[9] Albarracin, Pedro, *Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz*, Segunda Edicion, LITOCHOA, Bucaramanga, Colombia (1993)